

Analyse der menschlichen Einflussfaktoren und Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Malte Hammerl
aus (Geburtsort): Braunschweig

eingereicht am: 21. Dezember 2010
mündliche Prüfung am: 11. Februar 2011

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
Prof. Dr. phil. habil. Oliver Sträter

Meinem zu früh verstorbenen Vater und meiner Mutter

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Grundlagen und Werkzeuge zur Integration menschlicher Faktoren in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr vorgestellt und eine qualitative Methode zur vergleichenden Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit entwickelt. Hintergrund dafür ist, dass für die Analyse des menschlichen Einflusses auf Betrieb und Sicherheit des Eisenbahnverkehrs bisher kaum geeignete Ansätze zur Verfügung standen.

Trotz der hohen Automatisierung oder Absicherung menschlicher Handlungen tragen Menschen für die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs nach wie vor eine große Verantwortung. Dies gilt insbesondere für den Störungsbetrieb, wenn technische Schutzvorkehrungen außer Kraft sind und Menschen selten auszuübende Tätigkeiten durchführen. Menschliche Einflussfaktoren müssen in Sicherheitsbetrachtungen einbezogen werden, da an die menschlichen Fähigkeiten nicht angepasste Arbeitssysteme Fehler begünstigen. Überdies wird aktuell ein hoher Anteil der Eisenbahnunfälle menschlichen Fehlern zugeschrieben.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst festgestellt, dass für die Integration menschlicher Faktoren in den Gestaltungs- und Sicherheitsbewertungsprozess eine interdisziplinäre Vorgehensweise mit ingenieurtechnischer und psychologischer Expertise unerlässlich ist. Eine Analyse bisheriger Publikationen ergibt, dass die menschlichen Faktoren trotz ihrer Bedeutung bislang nur wenig in die Gestaltung des Eisenbahnsystems eingeflossen sind. In Verlässlichkeits- und Sicherheitsbetrachtungen werden Angaben über die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler benötigt. Im Zuge der Bewertung existierender Ansätze zur Beschreibung der menschlichen Zuverlässigkeit werden die Nachteile einiger Modelle deutlich. Die in der Praxis verwendeten, festen Fehlerwahrscheinlichkeiten bilden menschliches Verhalten nicht adäquat ab. Bestehende Verfahren der sog. *Human Reliability Analysis* sind sehr komplex oder berücksichtigen nicht alle Fehlermodi.

Zur ganzheitlichen Betrachtung menschlicher Fehler wird ein neues, tabellarisches Modell menschlicher Verhaltensmöglichkeiten präsentiert. Des Weiteren werden die Arbeitssysteme von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern sowie erstmals ihre Interaktionen und zugehörige Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem modelliert. Für die Entwicklung einer handhabbaren Methode zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr wird auf die Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren zurückgegriffen. Die so genannte *Mensch-Barrieren-*

Interaktion verwendet die Komplexität der Interaktion, die zur Herstellung (oder Unterdrückung) einer Sicherheitsfunktion notwendig ist, als Maßgabe für die Fehleranfälligkeit. In übersichtlich gehaltenen Diagrammen werden die Barriersysteme und Barrierenfunktionen zusammengestellt und die Barrierenarten typisiert. Über eine Reihe von Kriterien wird eine qualitative Bewertung möglich, die vergleichende Aussagen über verschiedene Ausprägungen von Sicherheitsvorkehrungen erlaubt, bei denen der Mensch einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktion hat.

Die entwickelten Modelle können künftig als Beschreibungsmittel für die Integration menschlicher Faktoren in Sicherheitsbetrachtungen dienen. Die *Mensch-Barrieren-Interaktion* repräsentiert zum einen ein neues Analyseverfahren für menschliche Fehler bei sicherheitskritischen Handlungen und ihre Auswirkungen. Zum anderen verspricht die Methodik aufgrund ihrer Handlichkeit, eine Hilfe bei der Bewertung von Sicherheitsvorkehrungen in der Eisenbahnpraxis zu sein. Aufbauend auf dieser Arbeit sollten die qualitativen Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit auf Ordinalskala zu semi-quantitativen und später quantitativen Angaben weitergeführt werden.

Abstract

In this thesis, basic models and tools for the integration of human factors into safety analyses in railways applications are presented. In addition, a qualitative method for the comparative assessment of human reliability is developed. The work is motivated by the actual lack of suitable approaches for the analysis of the human impact on railway operation and safety.

In spite of the high level of automation and the protection of human actions by technical systems, humans are still responsible for railway safety to a certain extent. This is predominantly true for disrupted modes of operation when technical protection systems are deactivated and human perform rarely practiced tasks. Work systems not adapted to human capabilities can cause mistakes and errors. Moreover, a high percentage of railway incidents are accounted to human error. These facts emphasize that human factors have to be integrated in safety assessments.

In the present work, it is declared that an interdisciplinary approach with engineering and psychology expertise is necessary for the integration of human factors in the design and safety processes in railways. A review of existing publications shows that rail human factors have only been considered to a limited extent so far, at least in Germany. In dependability and safety considerations, particularly data on human error probabilities are needed. While existing approaches for the modelling of human reliability are analysed, their drawbacks are highlighted. Particularly, fixed human error probabilities used in practice are not sufficient for a sophisticated model of human performance. Existing methods in human reliability analysis are often very complex or do not take all error modes into account.

For a holistic perspective on human error, a new, tabular model of the ways of human performance is presented. In addition, the work systems of train drivers and train controllers are modelled. For the first time, the interactions between personnel and the corresponding influence factors are demonstrated. For the development of a handy method for the assessment of human reliability in railway applications, defences are understood as barriers. The approach of so-called human-barrier-interaction analyses the complexity of the interaction that is necessary for the implementation or the suppression of a safety function. The complexity serves as the central criterion for the error-proneness. In clearly arranged diagrams, barrier systems and barrier functions are depicted, and barrier types can be distinguished. A set of detailed criteria enables a qualitative assessment that permits comparative

evidence concerning defences where human operators have an influence on the safety function.

The models developed in this thesis can serve as tools for the integration of human factors into safety assessment. The approach of human-barrier-interaction firstly represents a new method to analyse human reliability for safety critical tasks. Secondly, thanks to its manageability, the method may support the assessment of safety defences in railway engineering practice. Beyond the scope of this work, the qualitative results for human reliability on an ordinal scale should be extended to semi-quantitative statements and later to quantitative information.

Synthèse

Cette thèse a pour objet les modèles et les outils pour l'intégration des facteurs humains dans les analyses de risque (cindynique) dans le domaine ferroviaire. Par ailleurs, une méthode qualitative pour une évaluation comparative de la fiabilité humaine est développée. Ce travail est motivé par le manque actuel d'approche appropriée concernant l'analyse de l'impact des facteurs humains sur l'exploitation et la sécurité dans les transports ferroviaires.

Malgré le haut niveau d'automatisation et les moyens techniques de protection face aux actions humaines (erronées) l'opérateur humain reste une cause potentielle d'insécurité. Ceci est d'autant plus le cas dans les phases d'exploitation perturbées lors desquelles les protections techniques sont désactivées et où l'opérateur humain réalise des tâches qui sont rarement pratiquées. Les lieux de travail peuvent amener l'erreur humaine s'ils ne sont pas adaptés aux capacités humaines. De plus, un pourcentage élevé d'incidents ferroviaires sont attribuées à des erreurs humaines. Ces faits expriment que les facteurs humains doivent être intégrés aux analyses de risque.

La première partie de ce document démontre qu'une approche pluridisciplinaire, intégrant les sciences pour l'ingénieur et la psychologie, est nécessaire pour l'intégration des facteurs humains dans les processus de conception et de mise en sécurité dans le domaine ferroviaire. Une étude bibliographique souligne que les facteurs humains, bien qu'importants, ne sont pas assez pris en considération jusqu'à présent, du moins, en Allemagne. Dans les analyses de sûreté de fonctionnement, les probabilités d'erreur humaine sont des données nécessaires. L'analyse des méthodes et modèles existants fait apparaître les faiblesses de certaines approches. Plus particulièrement, les probabilités d'erreurs humaines données, sont utilisées qu'occasionnellement en pratique et ne permettent pas de modéliser finement le comportement humain. Les méthodes actuelles dites « HRA » (Human Reliability Analysis) sont très complexes et/ou ne considèrent pas tous les types d'erreurs humaines.

Pour une approche holistique à l'erreur humaine, un nouvel modèle du comportement humain – mis sous forme de tableau – est présenté. De plus, les tâches des conducteurs et des agents circulation ferroviaires sont modélisées – pour la première fois, leurs interactions et les facteurs d'influence sont constitués. Pour le développement d'une méthode maniable pour l'évaluation de la fiabilité humaine dans le

domaine ferroviaire, les moyens de sûreté sont considérés comme des barrières. La nouvelle approche, baptisée « interaction homme-barrière » analyse la complexité qui est nécessaire pour l'établissement ou la suppression de la fonction de sécurité. La complexité ensuite représente le critère central pour la susceptibilité d'échec. Par le biais de diagrammes clairs, les corps et les fonctions des barrières sont représentés. Par ailleurs, les différents types de barrières sont distingués. A l'aide de plusieurs critères détaillés, une évaluation qualitative permet de comparer des moyens de sécurité pour lesquels l'opérateur humain a une influence sur le bon fonctionnement.

Les modèles présentés dans cette thèse peuvent servir comme dispositifs pour l'intégration des facteurs humains aux analyses de risque. L'approche de « l'interaction homme-barrière » représente une nouvelle méthode pour l'analyse de la fiabilité humaine pour des tâches importantes au regard de la sécurité. Grâce à sa maniabilité, elle convient également pour l'aide à l'évaluation des mesures de sécurité dans l'ingénierie ferroviaire. En perspective, les résultats qualitatifs doivent être développés et enrichis par des études semi-quantitatives et, ultérieurement, par des valeurs quantitatives.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig. Ich danke dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer als meinem Doktorvater für die Unterstützung und kontinuierliche Begleitung meiner Arbeit. Der mir in der Abteilung Bahnsysteme in der Anfangszeit beim Aufbau der Sparte Rail human factors gewährte Freiraum hat wesentlich zum Gelingen meiner Forschungstätigkeiten beigetragen. Bei Prof. Frédéric Vanderhaegen bedanke ich mich für die Ermöglichung meiner viermonatigen Tätigkeit als Gastwissenschaftler an der Universität Valenciennes in Frankreich, während der die Idee zur *Mensch-Barrieren-Interaktion* entstanden ist.

Mein Dank gilt darüber hinaus Herrn Prof. Dr. phil. habil. Oliver Sträter, Leiter des Fachgebiets Arbeits- und Organisationspsychologie am Institut für Arbeitswissenschaft und Prozessmanagement der Universität Kassel, für die Übernahme des Koreferats. Die regelmäßigen Treffen und die Unterstützung aus arbeitspsychologischer Perspektive waren für die Bearbeitung der interdisziplinären Fragestellung von großem Wert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder, Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei den Kollegen im Institut für Verkehrssystemtechnik, die zum Forschungsfortschritt in den Themen Rail human factors und menschliche Zuverlässigkeit einen wesentlichen Beitrag geleistet haben. Sehr dankbar bin ich Markus Talg, ohne dessen wunderbare Zusammenarbeit die Entwicklung der Methodik nicht möglich gewesen wäre. Bei Jacob Kohlruss und den *drei amerikanischen Astronauten* bedanke ich mich für die herzliche Atmosphäre im Büro. Den Teilnehmern des Doktorandenstammtischs *Promotion Locomotion* bin ich für die kritischen Diskussionen und Hinweise dankbar. Vielen anderen Kollegen danke ich für die angenehme Zusammenarbeit am Institut. Bei Kristin Koch und Christoph Lackhove bedanke ich mich für die Durchsicht der Arbeit.

Schließlich geht mein ausdrücklicher Dank an meine Eltern für die fortwährende Unterstützung seit Kindertagen und die Ermöglichung meines Studiums, das erst die Grundlage für diese Arbeit gelegt hat. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden und allen Wegbegleitern aus nah und fern, die mit ihrem Interesse, ihrem Verständnis und einem gewissen Ausgleich zum Fortgang dieser Dissertation beigetragen haben. Schließen möchte ich mit einem besonderen *Danke* und einem lieben Augenzwinkern an Nina Jellentrup.

„Im Zusammenhang mit der ständig zunehmenden Automation und dem Einsatz von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen im spurgebundenen Verkehr gewinnt die Frage des sinnvollen Zusammenspiels von Mensch und Maschine mehr und mehr an Bedeutung. Zwar wird die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine – durch den technischen Fortschritt bedingt – auf eine immer höhere Ebene verlagert, doch wird sie prinzipiell stets erhalten bleiben. [...] Hierbei spielen die quantitative und die qualitative Belastbarkeit des Menschen [...] sowie seine – mehr oder minder davon beeinflusste – Zuverlässigkeit und Schnelligkeit eine wichtige Rolle, da sie wesentliche Kriterien für die sichere und auch wirtschaftliche Abwicklung der Transportvorgänge sind.“

aus dem Vorwort zu Peter Schnell: Die Tätigkeit des Fahrdienstleiters im Mensch-Maschine-System „Fahrdienstleiter – Mechanisches Stellwerk“, Diss. Universität Stuttgart, 1975

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Ziele	5
1.3	Vorgehensweise	6
2	Menschliche Faktoren im Eisenbahnverkehr	9
2.1	Ingenieurpsychologie und Human factors	9
2.2	Systemtechnik und Arbeitsplätze des Eisenbahnverkehrs	10
2.3	Auftreten von Human factors im Eisenbahnverkehr	13
2.4	Interdisziplinarität	15
2.5	Stand der Forschung	16
2.6	Resümee	23
3	Menschliche Zuverlässigkeit in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr	25
3.1	Verlässlichkeitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr	26
3.2	Menschliche Zuverlässigkeit und menschliche Fehler	30
3.3	Menschliche Fehler im Eisenbahnsystem	38
3.4	Daten zur Quantifizierung menschlicher Fehler	46
3.5	Methoden zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit	51
3.5.1	Grundsätzliche Vorgehensweise der Methoden	51
3.5.2	Existierende Verfahren allgemeiner Art oder anderer Industrien	52
3.5.3	Existierende Verfahren für Eisenbahn-Arbeitsplätze	58
3.5.4	Zweite Generation von existierenden Verfahren	61
3.5.5	Diskussion der Bewertungsverfahren	62
3.6	Resilience engineering	65
3.7	Resümee	66
4	Modellierung des menschlichen Verhaltens und der Mensch-Maschine-Interaktion im Arbeitssystem	71
4.1	Tabellarisches Modell zur Klassifikation menschlichen Verhaltens .	72
4.2	Mensch-Maschine-Systeme	77
4.3	Menschliche Informationsverarbeitung	81

4.4	Entwicklung von Modellen für den Eisenbahnverkehr	84
4.5	Leistungsbeeinflussende Faktoren im Eisenbahnverkehr	91
4.6	Resümee	95
5	Nutzung der Sicherheitsbarrieren für die Methodenentwicklung	97
5.1	Grundlagen zu Barrieren	97
5.2	Ansatz und Vorgehensweise der entwickelten Methodik	106
5.3	Identifikation der Barrieren	111
6	Entwicklung der Methode zur Bewertung der Mensch-Barrieren-Interaktion	117
6.1	Dekomposition der Barrierenfunktion	117
6.2	Entwicklung der Mensch-Barrieren-Interaktion	121
6.3	Analyse symbolischer und immaterieller Barrieren (Typen A und B)	132
6.4	Analyse funktionaler Barrieren (Typ C)	141
6.5	Analyse menschlicher Fehler in der Mensch-Barrieren-Interaktion .	145
6.6	Nutzungsmöglichkeiten der Methode	153
6.7	Anwendung der Methode im Eisenbahnverkehr	155
6.8	Beispiel	162
7	Weiterentwicklungen, Ergebnisse und Ausblick	173
7.1	Ausblick auf eine Weiterentwicklung zur semi-quantitativen Bewertung	173
7.2	Ergebnisse der Arbeit und genereller Ausblick	178
	Literaturverzeichnis	189
	Abbildungsverzeichnis	210
	Tabellenverzeichnis	214
A	Abbildungen und Tabellen	217

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die menschlichen Fähigkeiten und Bedürfnisse wurden bei der Gestaltung der Arbeitsplätze im Eisenbahnverkehr über lange Zeit nur wenig oder wenig systematisch berücksichtigt. Die Weiterentwicklung der Arbeitsplätze erfolgte traditionell stattdessen durch die Einführung technologischer Errungenschaften. Prinzipien der Arbeitssicherheit und der grundsätzlichen Ergonomie finden inzwischen Anwendung bei der Gestaltung der Führerräume und Arbeitsumgebungen in Leitstellen und Stellwerken. Den kognitiven Fähigkeiten des Menschen – den informationsverarbeitenden Prozessen – ist allerdings im Eisenbahnverkehr bislang wenig Beachtung geschenkt worden. Dies ist kritisch, da durch die fortschreitende Automatisierung den Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern zunehmend eine überwachende, weniger eine ausführende, also eine kognitiv statt körperlich belastende Tätigkeit zugewiesen wird. Schließlich ist durch langjährige Forschung auf dem Gebiet der Ingenieurpsychologie nachgewiesen worden, dass den menschlichen Fähigkeiten nicht angepasste Arbeitssysteme, etwa kompliziert oder unübersichtlich gestaltete Benutzeroberflächen, Fehler hervorrufen können und daher Risiken für die Sicherheit und Hemmnisse für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems darstellen.

Die Sicherheit spielt in der Eisenbahntechnik traditionell eine herausragend wichtige Rolle. Sie hängt nicht allein von der Zuverlässigkeit der technischen Komponenten, sondern zu großen Teilen auch von der Fehleranfälligkeit des Menschen ab. Vielerorts wurde versucht, den Anteil des Menschen an sicherheitskritischen Handlungen durch Automatisierung zu reduzieren. Doch hierbei handelt es sich aus ingenieurpsychologischer Sicht erstens um einen veralteten Ansatz, da z.B. Menschen in manchen Aufgaben Maschinen überlegen sind, zweitens können nicht bei allen Funktionen menschliche Handlungen durch technische Systeme überwacht oder abgefangen werden.

Der Einfluss des Menschen auf die Sicherheit des Eisenbahnsystems ist nach wie vor hoch. Ein hoher Anteil der glücklicherweise wenigen Eisenbahnunfälle wird mensch-

lichen Fehlern zugeschrieben [2] und die Unfallhäufigkeit durch einen menschlichen Fehler liegt Unfallursachenanalysen zufolge um den Faktor 100 bis 10.000 höher als durch einen technischen Defekt [17]. Eine Einteilung in menschliches oder technisches Versagen ist für die Analyse und Herausarbeitung von Gegenmaßnahmen eine unzureichende Herangehensweise – bei einem Unfall spielen immer eine große Zahl organisatorischer, betrieblicher und technischer Faktoren eine Rolle. Um diese Phänomene der Interaktion von Menschen in technischen Umgebungen angemessen zu berücksichtigen, fordern einschlägige Normen die Einbeziehung dieser menschlichen Faktoren in die Gestaltung des soziotechnischen Systems Bahn [32].

Insbesondere im Risikobewertungs- und Sicherheitsnachweisprozess im Eisenbahnverkehr kann die Frage, wie die Eigenschaften und Fähigkeiten der Mitarbeiter, also die menschlichen Einflussgrößen, einbezogen werden können, bislang nicht umfassend beantwortet werden, obwohl die Normen eine Berücksichtigung fordern. Für quantitative Risikoanalysen sind Ausfallraten *technischer* Komponenten hinreichend gut schätzbar. Die Wahrscheinlichkeit für eine menschliche Fehllhandlung zu bestimmen, ist eine komplexe Aufgabe, die industrieübergreifend nicht abschließend gelöst ist und für die speziell im Eisenbahnverkehr bisher kaum Ansätze zur Verfügung standen. Im Bereich menschlicher Fehler wird vielerorts noch auf veraltete Modelle zurückgegriffen, die nicht alle Ausprägungen menschlichen Verhaltens abbilden können. Hier besteht ein Forschungsbedarf nach handhabbaren Verfahren, die gefährliche Handlungen berücksichtigen, die aus Systemsicht zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht erforderlich sind.

Die letzte deutschsprachige Arbeit, die sich dem Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs widmet, die Dissertation von HINZEN [77], wird in der Praxis leider gelegentlich falsch interpretiert bzw. angewendet. Außerdem haben sich seit Erscheinen der Arbeit 1993 sowohl im Risikobewertungsprozess als auch an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr viele Änderungen gezeigt, sodass eine neue Bewertung bzw. Überarbeitung der grundlegenden Analytik erforderlich erscheint. Ein Blick in die Forschung zur menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr gibt für die Einbeziehung menschlicher Einflussfaktoren in Verlässlichkeitsbetrachtungen keine tauglichen Antworten. Der sich anschließenden Frage, durch welche Gestaltungsmaßnahmen menschliche Fehler reduziert werden können, konnte für die Arbeitsplätze im Eisenbahnsystem ebenso bisher nicht zufriedenstellend begegnet werden. Neue Methodiken für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems könnten die Sicherheitsnachweise für Prozeduren, in denen Menschen eingebunden sind, auf eine bessere Grundlage stellen. Solche Informationen zur menschlichen Zuverlässigkeit würden auch

eine wesentliche Hilfe für die Gestaltung einer angemessenen Sicherheit, im Sinne einer abgestimmten Dimensionierung der Technik zugunsten der Wirtschaftlichkeit, bedeuten.

Die menschengerechte, auch kognitiv ergonomische Gestaltung der Arbeitssysteme und die Analyse und Bewertung menschlichen Verhaltens als Baustein von Sicherheitsbetrachtungen sind von Bedeutung, wenn für Hauptbahnen neue Technologien eingeführt werden (z.B. Fahrerassistenzsysteme für das energiesparende Fahren), auf Nebenbahnen nach kostengünstigen und personalarmen Lösungen gesucht wird sowie wenn sich die Arbeitsbedingungen durch die Harmonisierung des europäischen Eisenbahnverkehrs verändern. Die Öffnung des Marktes, die Herstellung von Kompatibilität in Regeln und Technologien, z.B. der Einführung des europäischen Zugbeeinflussungssystems ETCS, bringen neue Rahmenbedingungen für die Arbeitsplätze der Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter mit sich.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass trotz der wichtigen Rolle, die der Mensch im Eisenbahnsystem einnimmt, ein systematischer und aktueller Ansatz für die Analyse und Gestaltung dieser Arbeitssysteme bislang fehlt. Für die Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr ist der Stand der Forschung lückenhaft. Kernansatz der vorliegenden Untersuchungen ist also, durch die Betrachtung der menschlichen Einflussfaktoren in den Gestaltungs- und Sicherheitsbewertungsprozessen einen Beitrag für die Sicherheit und die Leistungsfähigkeit des Eisenbahnsystems zu leisten.

1.2 Ziele

Wichtigstes Ziel der Arbeit ist es, eine strukturierte Herangehensweise an die menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnverkehr zu bieten. Insbesondere die Einbeziehung menschlicher Leistungsfähigkeit bzw. menschlicher Fehler in Sicherheitsbetrachtungen steht dabei im Vordergrund. Die Methoden und Modelle schlagen dabei eine Brücke zwischen Arbeitswissenschaft, Psychologie, Eisenbahn- und Ingenieurwesen sowie der Sicherheitstechnik. Die Aufgabenstellung für das vorliegende Werk gliedert sich dabei in die zwei folgenden, aufeinander aufbauenden Schritte:

1. Schaffung einer grundlegenden Analytik für die Einbeziehung menschlicher Einflussfaktoren in die Gestaltung eines sicheren Eisenbahnsystems.

2. Entwicklung eines Schlüssels zur Integration menschlichen Verhaltens und menschlicher Fehler in Betrachtungen zur Verlässlichkeit (RAMS: Reliability, Availability, Maintainability, Safety) des Eisenbahnsystems durch Erstellung einer handhabbaren Methode zur vergleichenden Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit für Risikoanalysen.

Die wissenschaftliche Frage der Arbeit lautet also: *Auf welcher Grundlage und mit welcher Methode lassen sich die menschlichen Einflussfaktoren künftig besser in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr integrieren?*

In der Arbeit werden schließlich nur die Arbeitsplätze der Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter analysiert, da ihre Arbeit einen besonders direkten Einfluss auf den Eisenbahnbetrieb hat. In diesem Bereich herrschen große Forschungspotenziale, da diese Tätigkeiten bereits stark mental geprägt sind und sich stark verändert haben. Für die Integration menschlicher Einflussfaktoren in Verlässlichkeitsbetrachtungen können Grundlagen und eine Richtschnur gegeben werden. Für eine alle Lebenszyklusphasen umfassende Lösung ist das Eisenbahnsystem zu heterogen und sind auch die Grundlagen in diesem Feld zu Beginn dieser Arbeit zu bruchstückhaft. Auf die Bewertung technischer Zuverlässigkeitsgrößen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Bezüglich der Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit ist zu sagen, dass aufgrund der Komplexität und Variabilität der menschlichen Leistungsfähigkeit im Rahmen dieser Arbeit keine quantitativen Werte für die menschliche Zuverlässigkeit geliefert werden, die direkt in die Methoden der Risikoanalyse eingesetzt werden könnten. Eine Validierung der semi-quantitativen Aussagen muss bis auf Beispiele in dieser Arbeit künftigen Forschungsarbeiten vorbehalten bleiben. Solche psychologischen Studien mit Befragungstechniken, Simulatorfahrten oder Unfalldaten sind in der Regel sehr umfangreich.

1.3 Vorgehensweise

Für die Bewertung der menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnverkehr ist zunächst eine Erläuterung des Stand der Forschung nötig. Kapitel 2 beginnt daher mit der Verbindung der Ingenieurpsychologie mit der Systemtechnik des Eisenbahnverkehrs und stellt eine Aufarbeitung der Literatur bereit. Da alle Aspekte menschlicher Einflussfaktoren über die menschliche Zuverlässigkeit letztlich auch einen Einfluss auf Betrieb und Sicherheit des Eisenbahnverkehrs besitzen, sind diese Grundlagen auch zentral für die anschließende Verbindung von *Human factors*,

Sicherheitstechnik und Eisenbahnsystemtechnik in Kapitel 3. Um im Verlauf der Arbeit eine neue Methodik zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr entwickeln zu können, liefert das Kapitel eine Aufarbeitung und Bewertung bisheriger Verfahren sowohl für Eisenbahnsysteme, als auch industrieübergreifend. Da bisher kein handhabbarer Ansatz für die Integration menschlicher Einflussfaktoren in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr besteht, wird in Kapitel 4 das Fundament eines neuen Ansatzes geliefert. Dabei werden zum einen Modelle zu menschlichen Fehlern, als auch zur systematischen Herangehensweise an Mensch-Maschine-Systeme und -Interaktionen vorgestellt. Die Modelle und Erläuterungen aus Kapitel 4 eignen sich für die Einbeziehung des Menschen in Verlässlichkeitsbetrachtungen und sind gleichzeitig Grundlage für die in Kapitel 5 und 6 entwickelte Methodik zur Analyse der menschlichen Fehleranfälligkeit. Die dafür notwendige Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen und -funktionen wird in Kapitel 5 durch die Vorstellung von Barrieren erläutert. Das Kapitel beschreibt außerdem den methodischen Ansatz und die Identifikation der Barrieren. Im sechsten Kapitel wird die Analytik im Detail herausgearbeitet. Am Ende wird die *Mensch-Barrieren-Interaktion* auf ein Beispiel im Eisenbahnverkehr angewandt und die Plausibilität und Praktikabilität der entwickelten Methode gezeigt. Das siebente Kapitel zeigt zum einen eine Weiterentwicklung der qualitativen Betrachtungen zu einer semi-quantitativen Methode auf. Zum anderen werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein genereller Ausblick auf mögliche, künftige Forschungsarbeiten im Bereich menschlicher Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr gegeben.

2 Menschliche Faktoren im Eisenbahnverkehr

Die Analyse der menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnverkehr wird in dieser Arbeit mit einem neuen, interdisziplinären Ansatz verfolgt. Er bringt eine arbeitspsychologische Perspektive in die bisher ingenieurmäßig geprägten Arbeiten der Eisenbahnsystemtechnik ein. Dieses Kapitel beschreibt zunächst sowohl zu *Human factors* als auch zum Eisenbahnverkehr die wesentlichen Grundlagen, bevor die beiden Disziplinen zusammengebracht werden. Während die Interdisziplinarität des Themas erläutert wird, werden einige Festlegungen zum Schwerpunkt der Arbeit getroffen. Im Anschluss wird der Stand der Forschung beschrieben. Ein Resümee zum gesamten Komplex *Rail human factors* beendet dieses Kapitel.

Die Einordnung des Themas sowie die Beschreibung des Standes der Wissenschaft sind für diese Arbeit zentral, da die wissenschaftliche Grundlage trotz der hohen Bedeutung, die Menschen im Eisenbahnsystem haben, gering und recht bruchstückhaft ist. Daher erscheint eine systematische Aufarbeitung und Bewertung auch einige Jahre zurückliegender Publikationen notwendig. In diesem Zusammenhang ist dieses Kapitel bereits wesentlich für künftige Analysen des menschlichen Einflusses auf Prozesse im Eisenbahnverkehr.

2.1 Ingenieurpsychologie und Human factors

Die Wissenschaft der Interaktion von Menschen mit technischen Systemen wird international allgemein *Human factors* genannt. Eine sehr verbreitete und anerkannte Definition für diesen Wissenschaftszweig stammt von der *International Ergonomics Association* und der *Human Factors and Ergonomics Society* [87]:

„*Human factors* repräsentiert einen Wissenschaftszweig, der sich mit dem Verständnis der Interaktion unter Menschen sowie gegenüber anderen Elementen eines Systems beschäftigt, sowie der Gedanken (der Beruf), der Theorien, Prinzipien, Daten und Methoden in der Gestaltung so anwendet, dass das menschliche Wohlbefinden und die Leistung des

Gesamtsystems optimiert werden. Menschen, die sich mit Humanfaktoren auseinandersetzen, leisten ihren Beitrag zur Gestaltung und zur Auswertung von Aufgaben, Arbeiten, Produkten, Arbeitsumgebungen und -systemen, um sie den Bedürfnissen, Fähigkeiten und Beschränkungen der Menschen anzupassen.“ (Übers. v. Verf.)

Die zweierlei Ziele des menschlichen Wohlbefindens und Optimierung der Leistung des Gesamtsystems seien hier ausdrücklich hervorgehoben. Es müssen also sowohl ingenieurwissenschaftliche als auch psychologische Erkenntnisse und Methoden zum Einsatz kommen. Die deutschsprachige Bezeichnung dieser Wissenschaft, die *Ingenieurpsychologie*, spiegelt begrifflich die Interdisziplinarität wieder und besitzt auch, wie die folgende Definition zeigt, eine grundsätzlich identische Zielsetzung [200]:

„Das Ziel der ingenieurpsychologischen Gestaltung ist allgemein die Verbesserung der Funktionalität von Systemen, insbesondere Verbesserungen hinsichtlich der Handhabbarkeit und Gebrauchstauglichkeit, der Zuverlässigkeit, Sicherheit und des Komforts und hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit.“

Es sei angemerkt, dass in der englischen Sprache für Themen der Ingenieurpsychologie direkt der Begriff *Human factors* verwendet und darüber hinaus häufig mit *ergonomics* gleichgesetzt wird. *Ergonomics* umfasst Gebiete, die – wenn Arbeitssysteme untersucht werden – in der deutschen Sprache in der Arbeitswissenschaft angesiedelt sind. In dieser Arbeit werden *human factors* oder *menschliche Einflussfaktoren* verwendet, da der deutsche Begriff *Faktor Mensch* (als etwaige Analogie zu *Human factors*) recht stark darauf gerichtet ist, dass der Mensch ausschließlich ein Sicherheitsrisiko darstellt. Der Term Humanfaktoren konnte sich bislang wenig durchsetzen. Außerdem ist zu beachten, dass *menschliche Einflussfaktoren* sowohl aktive, als auch passive Einflüsse beschreibt, also Wirkungen von Umgebungsbedingungen auf den Menschen und Auswirkungen der menschlichen Eigenschaften auf seine Umwelt, die Bewältigung der Aufgaben bzw. das Arbeitsergebnis.

2.2 Systemtechnik und Arbeitsplätze des Eisenbahnverkehrs

Die Eisenbahn ist ein schienengebundenes Verkehrsmittel für den Transport von Gütern und Personen. Die geringe Reibung zwischen Rad und Schiene verschafft der Eisenbahn einen Energievorteil gegenüber anderen Verkehrsträgern. Die geringe

Reibung führt aber gleichwohl zu langen Bremswegen, deren Länge teilweise weit über die Sichtweite der Fahrzeugführer hinausgeht. Zur Vermeidung von Kollisionen unter Schienenfahrzeugen verfügt die Eisenbahn über eine Kontrolle der Fahrtbewegungen von außen. Klassischerweise erteilen die Fahrdienstleiter aus ihren Stellwerken den Triebfahrzeugführern in den Zügen über die streckenseitig angeordneten Signale die Fahrerlaubnisse. Für eine ausführliche Darstellung der Systemtechnik des Schienenverkehrs wird auf PACHL [119] verwiesen. An dieser Stelle werden nur die wesentlichen Ausprägungen der wichtigsten Arbeitsplätze beschrieben, denn in vereinfachten Betriebsverfahren und bei Bahnen des Regional- und Nahverkehrs existieren teilweise andere oder zusätzliche, zentrale Arbeitsplätze. Sie unterscheiden sich mitunter deutlich und sollen aufgrund ihrer Breite hier nicht Gegenstand der Erläuterung sein.

Die früher an jedem Bahnhof dezentral angeordneten Stellwerke werden im Laufe der Zeit durch elektronische Stellwerke ersetzt und die Arbeitsplätze der Fahrdienstleiter werden deutschlandweit in einigen wenigen Betriebszentralen konzentriert. Die großen Unterschiede zwischen den Bauformen der mechanischen, elektromechanischen und Relais-Stellwerke und ihrer Oberflächen der letzten Jahrzehnte fallen zugunsten der Computer-Oberflächen der elektronischen Stellwerke weg. Die Arbeit des Fahrdienstleiters hat sich also von einer physischen Aufgabe mit mindestens optischem Kontakt zum Zugverkehr und zu Fahrgästen zu einer mental geprägten Tätigkeit an einem modernen Computerarbeitsplatz gewandelt. Die so genannten Fahrstraßen werden heute per Mausklick auf Start- und Zielsignal eingestellt, die zum Fahrweg gehörigen Weichen sowie Flankenschutzelemente laufen automatisch in die entsprechende Lage.

Um den Personen- und Güterzugverkehr statt bahnhofs- oder streckenspezifisch regional zu koordinieren sowie in Eisenbahnknoten die verschiedenen Zugprodukte und Reisendenanschlüsse im laufenden Betrieb zu organisieren, wurde der Arbeitsplatz des Disponenten eingeführt. Diese, ebenfalls an Computerarbeitsplätzen stattfindende Tätigkeit wird häufig in räumlicher Nähe zu den Fahrdienstleitern in den Betriebszentralen angeordnet.

Der Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers ist gekennzeichnet durch die Position im Führerstand an der Spitze des Zuges und durch die ständige Beobachtung der voraus liegenden Strecke. Unabhängig davon, ob es sich um den Führerstand einer Lokomotive, eines Triebwagens oder eines Triebzugs handelt, regelt der Triebfahrzeugführer in erster Linie mit Traktion und Bremsen die Geschwindigkeit des Zuges. Je nach Bauform des Triebfahrzeugs sowie je nach auf der Strecke vorherrschen-



Abbildung 2.1: Leitstellenarbeitsplatz (Foto: N. Jellentrup)



Abbildung 2.2: Arbeitsplatz im Führerstand (Foto: F. Feldmann)

dem Betriebsverfahren und Zugsicherungssystem können sich die Tätigkeiten der Triebfahrzeugführer im einzelnen recht stark unterscheiden. Rangierlokführer finden durch das regelmäßige *Fahren auf Sicht* wiederum andere Arbeitsbedingungen vor. Streckenlokomotiven sind in der Regel mit Zugsicherungssystemen ausgerüstet, die das *Fahren im Blockabstand* überwachen. Sie kontrollieren u.a., dass keine Schienenfahrzeuge in belegte Gleisabschnitte (Blöcke) einfahren. Klassischerweise wird diese Funktion auf konventionellen Eisenbahnstrecken in Deutschland durch streckenseitige Signale und die PZB (Punktförmige Zugbeeinflussung) übernommen. Geschwindigkeiten über 160 km/h verlangen eine Führerstandssignalisierung, bei der die Fahrterlaubnisse dem Triebfahrzeugführer im zentralen Display angezeigt werden sowie die Fahrt kontinuierlich durch die linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) überwacht wird. Ein Triebfahrzeugführer der Deutschen Bahn interagiert außerdem mit einem Fahrzeugdiagnosedisplay (links angeordnet), einem Zugfunkgerät zur fernmündlichen Kommunikation mit dem Fahrdienstleiter, anderen Zügen und anderen Stellen, sowie einer Fahrplananzeige *Elektronischer Buchfahrplan und Verzeichnis der Langsamfahrstellen (EBuLa)*. Für eine über diese sehr knappe Einführung hinausgehende Darstellung wird auf [26], [93] oder [122] verwiesen, eine Beschreibung aus psychologischer Sicht siehe [102].

2.3 Auftreten von Human factors im Eisenbahnverkehr

Die in den vorherigen Abschnitten erläuterten Bereiche der Human factors und der Eisenbahnsystemtechnik werden in diesem Abschnitt miteinander verknüpft. Die Fragestellung lautet also, wo menschliche Einflussfaktoren zu finden sind.

Die Definition der Human factors lässt sich, wie erstmals in [61] gezeigt, wie folgt auf das Eisenbahnsystem anwenden:

„Die Humanfaktoren im Eisenbahnverkehr, engl. *Rail human factors*, gelegentlich auch *Railway human factors*, repräsentieren ein Fachgebiet, das sich dem Wissenschaftszweig der Humanfaktoren unterordnet und sich mit dem Verständnis der Interaktionen von Menschen mit dem System Eisenbahn sowie Menschen untereinander im System Eisenbahn beschäftigt. Ziel ist es, die Sicherheit des Gesamtsystems Bahn und seine Leistungsfähigkeit sowie das menschliche Wohlbefinden zu verbessern.“

Die Interaktion zwischen Mensch und Technik steht an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr im Vordergrund, daher wurde dieser Punkt in der Definition zuerst genannt. Die Kommunikation unter Mitarbeitern und die Interaktion mit Fahrgästen darf jedoch nicht außenvor gelassen werden. In der Beschreibung der *Rail human factors* wurde die Sicherheit als besonderes Ziel hervorgehoben, da sie in der Eisenbahndomäne klassischerweise einen hohen Stellenwert einnimmt.

Allgemein gibt es drei Gruppen von Menschen, die mit dem Eisenbahnsystem interagieren:

- Mitarbeiter im Eisenbahnsystem
- Fahrgäste
- Außenstehende bzw. die Öffentlichkeit

Die Mitarbeiter stellen eine große Gruppe von dauerhaft mit dem Eisenbahnsystem in Verbindung stehenden Menschen dar. Die Fahrgäste nutzen Züge für Ortsveränderungen. Gleichzeitig gibt es Menschen, die das Eisenbahnsystem wahrnehmen oder die sich auf Bahnanlagen aufhalten, ohne mit Zügen zu reisen, als Negativbeispiel seien Vandalismus und Terrorismus genannt. Außerdem besteht beispielsweise auch für Führer von Kraftfahrzeugen und weitere Verkehrsteilnehmer eine Interaktion mit dem System Eisenbahn, wenn Bahnübergänge überquert werden.

Die Mitarbeiter im Eisenbahnsystem, *Betriebsbedienstete* bzw. *Betriebsbeamte*, werden in der deutschen Straßenbahnbau- und -betriebsordnung [16] und der Eisenbahnbetriebsordnung [40] definiert. Neben den Fachleuten, die das Eisenbahnsystem vor der Phase von Betrieb und Instandhaltung gestalten, sind die Mitarbeiter heutzutage im Wesentlichen

- Fahrdienstleiter,
- Disponenten, weitere Mitarbeiter in Leitstellen,
- Fahrzeugführer,
- Rangierer,
- Stationspersonal,
- Bordpersonal,
- Instandhaltungspersonal,
- jeweilige Vorgesetzte,
- Betriebsleiter.

In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt weniger auf die Fahrgäste und Außenstehenden gelegt. Die Betriebsbediensteten werden bewusst in den Mittelpunkt gerückt, da sie durch ihre Beschäftigung *kontinuierlich* in das System eingebunden sind. Die Betrachtung fokussiert sich des Weiteren auf die Arbeitsplätze Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter bzw. Disponent und Mitarbeiter in den Leitstellen. Diese Betriebsbediensteten haben im Gegensatz zu z.B. Instandhaltungspersonal einen entscheidenden Einfluss auf die Leistung und auf die Sicherheit des Verkehrssystems *im Moment des Betriebsgeschehens*. Bei ihren Aufgaben spielt auch die Kommunikation untereinander eine große Rolle. Außerdem ist die Arbeit der Eisenbahnfahrzeugführer und der Mitarbeiter in Leitstellen durch eine bereits recht hohe Automatisierung sehr stark kognitiv geprägt [160]. Das heißt, der Anteil physischer Tätigkeiten, für deren Gestaltung durch die Arbeitswissenschaft bereits umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen, ist bei diesem Personal gering. Die Mensch-Maschine-Interaktion, Informationsverarbeitung und ihre Auswirkungen, vertreten durch eine ingenieurpsychologische und sicherheitstechnische Herangehensweise wurden im Eisenbahnwesen bisher wenig studiert und stehen in dieser Arbeit im Vordergrund.

2.4 Interdisziplinarität

Im vorherigen Abschnitt wurde der Fokus auf Triebfahrzeugführer, Fahrdienstleiter und Disponenten gelegt. Speziell für diese zum einen sicherheitsrelevanten und zum anderen stark kognitiven geprägten Arbeitsplätze soll die Interdisziplinarität des Themas noch einmal hervorgehoben werden. Abbildung 2.3 gibt eine Übersicht über die Wissenschaften, die für die Untersuchung der menschlichen Einflussfaktoren genau dieser drei Gruppen von Mitarbeitern eine Rolle spielen. In der Grafik sind linker Hand die Wissenschaften mit psychologischem, rechts die Felder mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund zu sehen. Es wird dargestellt, dass neben dem Zusammenspiel zwischen Psychologie und systemspezifischen Ingenieurwissenschaften (zusammen unter dem Titel *Human factors*) auch die Arbeitswissenschaft und Sicherheitstechnik wichtige Erkenntnisse für die Beantwortung von Fragen zu den menschlichen Faktoren der Triebfahrzeugführer und Leitstellenmitarbeiter im Eisenbahnsystem bereitstellen.

Die Bewertung und Gestaltung von Arbeitssystemen lässt sich ebenso in den Bereich der Arbeitswissenschaften einordnen. Es ist zu beachten, dass – auch aufgrund der bereits geschilderten sprachlichen Unterschiede und in Ergänzung zur Darstel-

lung in der Abbildung – zwischen Arbeitswissenschaft, Ergonomie und Human factors große Überlappungsbereiche existieren. Einige klassische Teile der Arbeitswissenschaft, die ergonomische und anthropometrisch günstige Gestaltung von physischen Arbeitsbedingungen und -instrumenten zum einen und die Arbeitssicherheit (engl. *safety at work*) zum anderen, liegen nicht im Fokus dieser Arbeit. Eines der grundlegenden Ziele der Arbeitswissenschaft, die menschliche Zufriedenheit am Arbeitsplatz, darf jedoch wiederum neben der Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems als den globalen Zielen der vorliegenden Untersuchungen nicht vernachlässigt werden.

Die Sicherheitstechnik repräsentiert eine Wissenschaft, die für verschiedenen Domänen Konzepte und Methoden zur Bewertung, Gestaltung und Erhöhung von Sicherheit zur Verfügung stellt. In Risikoanalysen, die im englischen dem *Probabilistic risk assessment* oder *Probabilistic safety assessment* und im französischen den *Cindynique* zugeordnet werden, werden anhand von Zuverlässigkeitsdaten verschiedener Komponenten Gefährdungsraten technischer Systeme bewertet. Zwischen den Human factors und der Sicherheitstechnik hat sich das *Human reliability assessment* etabliert, das versucht, menschliche Fehler hinsichtlich ihrer Häufigkeit und Auswirkungen einzuschätzen und die Daten in Risikoanalysen und Sicherheitsnachweise zu integrieren.

Die Kooperation von Psychologen, Ergonomen sowie Ingenieuren und Sicherheitsexperten ist unerlässlich, um die Arbeitssysteme so zu gestalten, dass sie den menschlichen Fähigkeiten gerecht werden, und um menschliches Verhalten im sicherheitsrelevanten Mensch-Maschine-System zu bewerten, um letztendlich dem Eisenbahnsystem eine hohe Leistungsfähigkeit und Sicherheit zu verleihen.

2.5 Stand der Forschung

Aufbauend auf der Definition und Charakterisierung des Betrachtungsgegenstands wird in diesem Abschnitt der Stand der Forschung zu menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnverkehr, speziell für Triebfahrzeugführer und Mitarbeiter in Leitstellen des Eisenbahnverkehrs untersucht. Die internationale Forschung an den menschlichen Faktoren im Eisenbahnverkehr wird erst seit einigen Jahren verstärkt vorangetrieben. Insbesondere in Großbritannien finden seit ca. 2001 umfangreiche Studien statt, die den Begriff *Rail human factors* erst geprägt haben. Weltweit ist – insbesondere im Vergleich mit anderen Verkehrsträgern wie Luftfahrt und

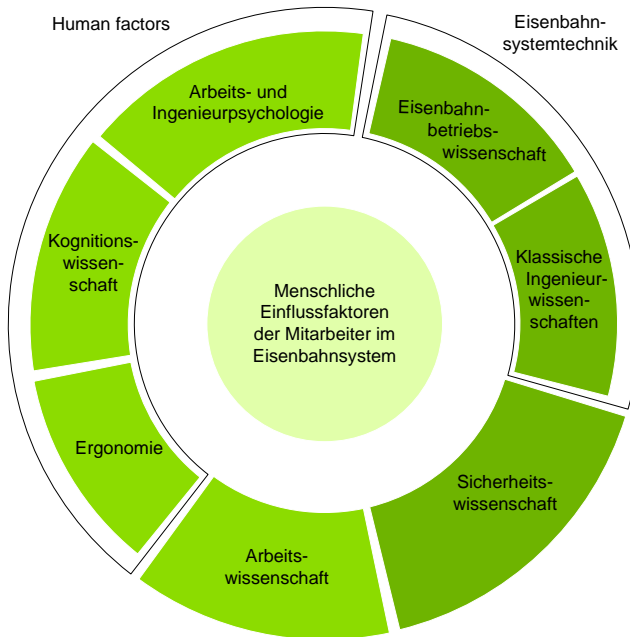


Abbildung 2.3: Einordnung der *Rail human factors* in benachbarte Themen

Kraftfahrzeugverkehr – bislang nur von einer sehr geringen Forschungsaktivität zu sprechen.

Die umfangreichsten Quellen zum Thema Rail human factors stellen die Werke dar, die die Proceedings der 1st und 2nd Conference on Rail Human Factors 2003 und 2005 enthalten [193], [194]. Zum gesamten Themenkomplex stehen außerdem zwei jüngere Übersichtsartikel zur Verfügung [192], [195]. Und schließlich geben die Tagungsbeiträge der 3rd International Conference on Rail Human Factors aus dem Frühjahr 2009 einen aktuellen Überblick, sie sind jedoch bisher nicht in gedruckter Form erschienen. Internationale Publikationen lassen sich wegen der Heterogenität der Eisenbahnsysteme und -betriebsverfahren teilweise nur eingeschränkt auf den deutschen Eisenbahnverkehr übertragen. Insbesondere in Großbritannien herrscht eine andere Sicherheitsphilosophie, technische Sicherungssysteme haben den Eisenbahnverkehr bisher nicht in der Weise durchdrungen wie es in Deutschland der Fall ist. Für deutsche Anwender sind daher überwiegend deutschsprachige Publikationen

von Interesse, die jedoch nicht zahlreich und teilweise auch schwer zugänglich sind. Gründe hierfür sind zum einen, dass stets versucht wurde, den Einfluss des Menschen durch technische Systeme zu minimieren oder abzusichern, zum anderen, dass bei Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht immer ein Interesse gegeben war, Forschungsergebnisse zu verbreiten. Im Folgenden wird versucht, ein trotz der genannten Zugangsschwierigkeiten möglichst umfassendes und dennoch knappes Review zu menschlichen Faktoren in Bahnsystemen zu geben, das als Basis für vielerlei Forschungsansätze im Bereich *Rail human factors in Deutschland* dienen mag.

Eine umfangreiche Aufarbeitung der deutschen Literatur aus psychologischer Perspektive ist bei MAAG ET AL. zu finden, wobei der Schwerpunkt auf Training, Eignungsuntersuchungen und posttraumatischer Behandlung von Personal, insbesondere von Triebfahrzeugführern, liegt [102]. Der Themenkomplex Belastung/Monotonie, der einen Großteil der Veröffentlichungen ausmacht, soll im Folgenden kurz vorgestellt werden. Ebenso wird die ergonomische und menschengerechte Gestaltung der Arbeitssysteme angesprochen, da dieses Thema in MAAG ET AL. weniger Beachtung findet, jedoch gerade das Oberflächen-Design und die resultierende Informationsverarbeitung einen großen Einfluss auf die menschliche Zuverlässigkeit haben. Der Stand der Forschung zur Integration menschlicher Handlungen in Sicherheitsbetrachtungen und Risikoanalysen wird im Kapitel 3 separat betrachtet.

Eine der ersten Arbeiten, in der die Mensch-Maschine-Interaktion im Eisenbahnsystem und die Arbeitsbelastung untersucht werden, ist 1975 die Dissertation von SCHNELL. Bereits zu diesem Zeitpunkt wird herausgestellt, dass mit dem zunehmenden Einsatz von Datenverarbeitungsanlagen die Mensch-Maschine-Funktionsteilung deutlich mehr zu berücksichtigen sein wird [153]. Eine hohe Belastung hat Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit der Arbeit des Fahrdienstleiters, und somit auf die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Bahnbetriebs. Es sei angemerkt, dass in dieser Arbeit die Begriffe Belastung und Beanspruchung wie in der Arbeitswissenschaft üblich verwendet werden. Demnach ist Belastung die Summe objektiv messbarer Größen, die auf den Bediener einwirken, Beanspruchung die resultierende, subjektive Wahrnehmung. Im Jahre 1980 wird durch PETER nachgewiesen, dass die Sicherheitsfahrschaltung – also das Betätigen der Totmannschaltung im Takt von ca. 30 Sekunden – nicht geeignet ist, die Triebfahrzeugführer wachsam zu halten [121]. Triebfahrzeugführer sind aufgrund von Gewöhnungseffekten und Unterbelastung auch in Zuständen hoher Müdigkeit und geringer Aufmerksamkeit noch in der Lage, die Sicherheitsfahrschaltung zu betätigen. Die Fahraufgabe ist stark durch Monotonie geprägt. Laut einiger älterer Studien

besteht dabei keine lineare Abhängigkeit zwischen Fahrgeschwindigkeit und Arbeitsbelastung [85], [114], [148]. Langsame Geschwindigkeiten, Bahnhofsein- und -ausfahrten stellen eine höhere Belastung dar als Hochgeschwindigkeitsfahrten (mit einem hohen Automatisierungsgrad und wenigen Halten) oder Güterzugfahrten, insbesondere in der Dunkelheit. Diese Ergebnisse konnten in einer neueren Studie zur Gestaltung modularer Führerstände für den Regionalverkehr untermauert werden [142], hier wurde die Beanspruchung der Triebfahrzeugführer auch erstmals mit ingenieurpsychologischen Messmethoden untersucht. Im Rahmen eines Projekts zur Gestaltung eines neuen Ausbildungssystems und der Entwicklung eines Stressreduktionstrainings werden so genannte situationale und personelle Bedingungen sowie ihre Auswirkungen auf das Stresserleben bei Stadtbahnfahrern untersucht [37], [99], [100]. Schlecht vorhersehbare, schlecht beeinflussbare und komplexe Situationen sowie ein geringes Selbstwirksamkeitsgefühl werden als besonders belastend identifiziert. In der jüngsten Studie von DB Regio wurde die Belastungs-Beanspruchungssituation bei Triebfahrzeugführern mit Workshops und Fragebögen erhoben. Als Handlungsfelder wurden das komplexe Regelwerk und Dienstzeitregelungen identifiziert [18], [127].

Das Konzept *workload* des englischsprachigen Raums ist nicht identisch mit dem Modell Belastung/Beanspruchung. *Workload* ist auch trotz hohen wissenschaftlichen Interesses nicht klar definiert und mit psychologischen Messmethoden nur schwer greifbar. Im Auftrag des britischen *Rail Safety and Standards Board* wurde eine Herangehensweise für britische Triebfahrzeugführer entwickelt [130]. Es ist klar, dass ein optimaler *mental workload* ohne Überforderung und Unterforderung zur besten Leistung des Mensch-Maschine-Systems führen wird [199]. Andere internationale Studien versuchen, mit einer *Cognitive Work Analysis* oder Fahrer-Modellen die Tätigkeiten und die Leistungsfähigkeit der Triebfahrzeugführer zu beschreiben [91], [105]. Für Führer von Schienenfahrzeugen wurde auch eine technisch-mathematische Modellierung von Prozessen im Gehirn vorgeschlagen [14]. Diese Ansätze zielen häufig jedoch nur indirekt auf die Gestaltung von Arbeitsumgebungen oder Ableitung von Wahrscheinlichkeiten menschlicher Fehler ab.

Analysen für Fahrdienstleiter ergeben, dass die Zahl der abzufertigenden Züge und das Auftreten von Störungssituationen maßgeblich für die Beanspruchung sind [111], [112]. Im Rahmen der Einführung von Betriebszentralen wurden von der Deutschen Bahn die Arbeitsplätze der Fahrdienstleiter auf Belastung untersucht [113]. Mit Interviews und Messung physiologischer Daten wird herausgefunden, dass die Beanspruchung in Störungsszenarien deutlich ansteigt. Identifizierte Belastungsfaktoren sollen dazu dienen, künftig Stellbereiche für Fahrdienstleiter zu

bemessen [110]. Bei der Gestaltung einer neuen Stellwerksoberfläche werden 2007 auch arbeitspsychologische Verfahren eingesetzt, um die Arbeitsbeanspruchung zu analysieren. Mittels subjektiver Messmethoden wird ermittelt, dass neben dem Aufwand für Hilfsbedienungen und Rangierfahrten der spezifische Umstellaufwand für ein Stellteil, die Größe des Stellbereichs, die Anzahl der Zugfahrten und die zusätzlich vorzunehmenden Tätigkeiten die wesentlichen Eckdaten der Arbeitsbelastung für den Fahrdienstleiterarbeitsplatz repräsentieren [74].

Für die Fahrdienstleiter britischer Stellwerke sind bereits einige Methoden zur Erfassung des *workload* entwickelt worden [123], die mittlerweile auch genutzt und evaluiert werden. Zuglenkungssysteme, die die Fahrstraßen automatisch einstellen, senken erwartungsgemäß den Workload [8], geben aber auch die Möglichkeit für eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Systems.

In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass bei den betrachteten Arbeitsplätzen im Eisenbahnsystem heutzutage durch Automation und neue Technologien nach und nach eine Unterforderung im Regelbetrieb und eine Überforderung im Störfall entstehen, die in einer Unzufriedenheit und Fehleranfälligkeit der Mitarbeiter resultiert [196]. Die allgemeinen *Ironien der Automatisierung* nach BAINBRIDGE sind also auch im Eisenbahnsystem anzutreffen [7]:

- Technische Systeme übernehmen Tätigkeiten, die der Mensch offenbar nicht gut bewältigen kann, aber der Mensch muss die Ausführung anschließend *überwachen*.
- Da aber die Automation oft komplexe Situationen nicht bewältigen kann, muss der menschliche Bediener genau in diesen Momenten wieder die Kontrolle übernehmen! Diese plötzliche Kontrollübergabe an den Menschen kann dann zu dem Phänomen *Out of the loop*, also nicht adäquater Reaktion führen.

Langfristig sind Fertigkeitsverlust, Monotonie und auch fehlende Arbeitsmotivation durch Wegfall der ausführenden Tätigkeiten Beispiele für Risiken der Automatisierung. Zu den Problemen zählen außerdem Misstrauen in die Technik (z.B. hervorgerufen durch Fehlalarme) auf der einen Seite oder Automatisierungsgläubigkeit des Benutzers auf der anderen Seite. Darüber hinaus sind vom technischen System dargebotene, d.h. nicht vom Bediener selbst generierte, Informationen im Gedächtnis weniger gut verfügbar (Generierungseffekt) [98]. Zu Überlegungen zur Automatisierung allgemein sei in die umfangreiche Literatur, z.B. nach [120] oder [160] verwiesen.

Im Rahmen einiger Studien werden neue Bedienverfahren oder Benutzerschnittstellen im Stellwerk vorgestellt, oft wird die Wichtigkeit der ergonomischen Gestaltung erkannt [15], [79], [118]. Dort werden die Anforderungen an die Gestaltung der Fahrdienstleiter-Arbeitsplätze in den Betriebszentralen der Deutschen Bahn AG angesprochen. Hier herrscht noch Potenzial, durch frühzeitige Einbeziehung der Nutzer und Expertenevaluationen die Gebrauchstauglichkeit der Oberflächen zu verbessern. Die Anpassung an die kognitiven Fähigkeiten der Bediener wird häufig nicht tiefer gehend reflektiert, vielmehr stehen die Automatisierung und die stets sichere Bedienung im Vordergrund. Insbesondere für Fahrdienstleiter-Arbeitsplätze besteht großer Forschungsbedarf, auch angesichts der Tatsache, dass Darstellungen und Bedienverfahren auf den Computerbildschirmen elektronischer Stellwerke von dem ursprünglichen, möglichst unveränderten Transfer vom Gleisbildstellwerk geprägt sind. Bemerkenswert auf internationaler Ebene ist das schwedische STEG-Projekt, in dem unter Berücksichtigung ergonomischer und psychologischer Gesichtspunkte eine neue Bildschirmoberfläche für Disponenten gestaltet wurde [90].

Für die Arbeitsumgebung der Triebfahrzeugführer existieren mit den Normen DIN 5566-1 bis -3 sowie dem Merkblatt UIC 651 des internationalen Eisenbahnverbands geltende Gestaltungsregeln [30], [178]. Es wird jedoch nur die *Anordnung* von Anzeigen und Instrumenten im Führerstand geregelt, im Vordergrund steht dabei die Anthropometrie, also die Anpassung an den menschlichen Körper. Bei der Einführung von neuen Führerraum-Anzeigesystemen werden einige grundsätzliche, ergonomische Überlegungen bereits berücksichtigt. Es wird vermehrt hervorgehoben, dass die menschengerechte und ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze einen wesentlichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems Bahn hat, z.B. [58], [149]. Lediglich punktuell kommen mit Aufgabenanalysen psychologische Verfahren zum Einsatz, um Elemente der zentralen Lokführeranzeige anzupassen [94], [116].

Die Harmonisierung der ergonomischen Gestaltung der Führerräume war Ziel der europäischen Projekte *European Driver's Desk* (EUDD) und seiner Fortsetzung (EUDD+), z.B. [143]. Die *kognitive* Ergonomie der Anzeigen als Mensch-Maschine-Schnittstelle wird durch das Arbeitspaket EUCAB im Projekt MODTRAIN in den Fokus der Forschungsbestrebungen gesetzt. Die Anforderungen an die Anzeigen im Einzelnen mündeten schließlich in der UIC-Richtlinie 612 [177]. Die Gestaltung einer harmonisierten Führerstandsanzeige für das europäische Zugsicherungssystem ETCS begann bereits 1992 unter Einbeziehung von Psychologen und Ergonomen und einer großen Zahl von Triebfahrzeugführern aus den Mitgliedsstaaten [104], [144]. Dieses mit ingenieurpsychologischer Expertise und Nutzertests

entworfene Display wird heute durch die Vornorm DIN CLC/TS 50459-1 bis -5 sowie Spezifikationen der Europäischen Eisenbahnagentur bestimmt [31], [45].

Grundsätzlich muss auch bei allen künftigen Gestaltungsfragen in Führerräumen die kognitive Ergonomie berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für den Prozess der europäischen Vereinheitlichung [106], [145]. Im Zuge der Herstellung einer internationalen und herstellerübergreifenden, *technischen* Interoperabilität wurde die *menschliche* Interoperabilität bisher fast ausschließlich mit dem Fokus der adäquaten Qualifikation des Personals diskutiert (s.u.). Zu Gestaltungsfragen bzw. dem menschlichen Umgang mit dem (auch intranational) häufiger werdenden Wechsel zwischen verschiedenen Zugsicherungssystemen in der Migrationsphase zu ETCS existieren lediglich punktuelle Studien (z.B. zur Kenntlichmachung eines dunkel geschalteten Streckensignals unter ETCS Level 2 siehe [146]) und es herrscht insgesamt noch großer Forschungsbedarf. Die Schwierigkeiten für den Bediener beim Moduswechsel bei Transitionen von Altsystemen zu ETCS oder vice versa werden auch durch YOUNG ET AL. im Rahmen eines fundierten Plädoyers für die Berücksichtigung von Human factors bei der Einführung von ERTMS in Großbritannien hervorgehoben [199].

Die Vernetzung der europäischen Eisenbahnverkehre erfordert aufgrund länderspezifischer Eisenbahnsysteme und Regelwerke insbesondere für die Triebfahrzeugführer eine einheitliche und erweiterte Ausbildung. Der Standardisierungsprozess der europäischen Eisenbahnagentur geht auf einen Bericht zu den Anforderungen für das Fahrpersonal im grenzüberschreitenden Verkehr zurück [117]. Es wurden bereits mehrere Studien durchgeführt, um Human-factors-Probleme im internationalen Verkehr aufzudecken und zu lösen, Berichte z.B. siehe [88] und [92]. Im deutschsprachigen Raum ist nur eine Studie über Implikationen für die Ausbildung von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern im deutsch-französischen Grenzverkehr bekannt [151]. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts 2TRAIN (*Training of Train drivers*) wurde ein einheitlicher Rahmen für Trainingsmethoden und -inhalte geschaffen, um ein einheitliches Ausbildungsniveau der Triebfahrzeugführer zu erreichen und zugehörige Bewertungsverfahren zu generieren. Dabei sind auch umfangreiche Analysen zu den Simulatoren der europäischen Eisenbahnverkehrsunternehmen durchgeführt worden, siehe [103], [152]. Mit gezielter, verhaltensorientierter Ausbildung von Fahrdienstleitern lassen sich laut [25] die Wahrscheinlichkeit für menschliche Fehlhandlungen reduzieren und schließlich auch die Sicherheit des gesamten Verkehrssystems verbessern. Von FISCHER ET AL. wird die Ausbildung von Triebfahrzeugführern mithilfe des Konzepts des *Situation Awareness* unterstützt [52].

Der Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet erscheint, vor allem mit Blick auf die deutschsprachigen Publikationen, bruchstückhaft. Das durchgeführte Review hat insbesondere zu den Themen Arbeitsbelastung/Monotonie sowie Oberflächengestaltung einige Quellen hervorgebracht, allerdings ist die Nutzung von psychologischen Erkenntnissen für die Gestaltung der Arbeitssysteme bei Weitem nicht so fortgeschritten wie in anderen Verkehrsträgern. Ein solider Ausgangspunkt fehlt bislang. Weitere Aspekte menschlichen Einflusses wie Aufmerksamkeit, Situations- und Risikobewusstsein, Sicherheitskultur, Regelkenntnis, Streckenkenntnis usw. werden in den zitierten Literaturquellen nur am Rande angesprochen. Fragen der klassischen Ergonomie (Anthropometrie) werden durch existierende Vorschriften zu einem gewissen Grade abgedeckt. Bei Elementen der kognitiven Ergonomie und nutzerzentrierten Entwicklung, gewissermaßen zur Fragestellung *Was kann der Bediener in welcher Situation wie gut und mit welcher Zuverlässigkeit, mit welchen und in welcher Weise gestalteten Instrumenten und Hilfsmitteln leisten?*, gibt es noch sehr große Forschungspotenziale. Diese Arbeit zielt darauf ab, existierende Modelle der Mensch-Maschine-Interaktion zu bewerten, Handwerkszeug für künftige Arbeiten aufzubereiten und somit eine taugliche Grundlage für weitere Forschungen in diesem Bereich zu schaffen.

2.6 Resümee

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass der menschliche Einfluss im System Bahn nur mit einem interdisziplinären Ansatz erforscht werden kann. Die Zusammenarbeit der Eisenbahningenieure mit Psychologen und Arbeitswissenschaftlern ist nötig, wenn die Arbeitsumgebungen an die menschlichen Fähigkeiten und Grenzen angepasst werden sollen. Die kontinuierliche Automatisierung und Absicherung menschlicher Handlungen haben die Arbeitsplätze verändert: sie werden heute durch kognitive und überwachende Tätigkeiten geprägt. Durch die Entbindung der Mitarbeiter von Regelbedienungen besteht das Risiko fehlerhafter Handlungen im Störfall. In vielerlei Betriebsmodi, insbesondere in der Rückfallebene, hat der Mensch jedoch noch und weiterhin einen direkten und auch sicherheitskritischen Einfluss auf das Betriebsgeschehen. Die Vermeidung von Fehlern trägt also wesentlich zu einem sicheren, stabilen und wirtschaftlichen Betriebsablauf des Bahnsystems bei.

Angesichts der großen Rolle, die die Sicherheit im Eisenbahnverkehr innehat, sowie des hohen Anteils an Unfällen, die menschlichem Versagen zugeschrieben werden, müssen alle Dimensionen menschlicher Einflussfaktoren künftig in sorgfältiger

Weise in den Gestaltungsprozess des Bahnsystems integriert werden. Ansätze zur nutzerzentrierten Gestaltung von interaktiven Systemen an Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr sind im Kontext des *Usability Engineerings* zu finden. Durch eine gebrauchstaugliche Gestaltung der Oberflächen können Ausbildungszeiten reduziert, die Arbeitseffizienz verbessert und Fehler vermieden werden [49], [64]. Die Berücksichtigung der Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung erhöht auf lange Sicht die menschliche Zuverlässigkeit am betreffenden Arbeitsplatz. Die Art und Weise, Frequenz und Inhalte der Ausbildung und regelmäßiger Trainings beeinflussen die Fertigkeiten des Triebfahrzeugführers oder Fahrdienstleiters. Die Kenntnisse der Regeln, des Fahrzeugs, der Strecke usw. sind zentral für die richtige Handlung im entscheidenden Augenblick. Nicht zu letzt begünstigen Stress (zu hohe Arbeitsbelastung) und Monotonie (zu geringe Arbeitsbelastung) unabsichtliche Fehler, vor allem in ungewohnten Situationen. Zusammenfassend ist zu sagen, dass die menschliche Zuverlässigkeit von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird. Ein großer Teil der Einflüsse konnte in diesem Kapitel bereits genannt und in den Forschungskontext eingeordnet werden. Diese Grundlage ist wesentlich für die folgenden, sicherheitsbezogenen Betrachtungen in dieser Arbeit. Auf die Wirkungszusammenhänge zwischen den leistungsbeeinflussenden Faktoren und der menschlichen Leistungsfähigkeit wird später in dieser Arbeit noch genauer eingegangen.

Anhand des Spektrums nationaler und internationaler Konferenzen kann festgestellt werden, dass das Interesse für die menschlichen Faktoren der Mitarbeiter des Eisenbahnverkehrs wächst. Diese Tendenz ist sowohl von Seiten der Ingenieurpsychologie als auch von Seiten der Eisenbahnsystemtechnik zu erkennen. Entscheidender Faktor ist für diese Entwicklung offenbar, dass in diesem Themenkomplex weitere Fragen im Zuge der europäischen Harmonisierung und Herstellung von Interoperabilität zu lösen sind. Für eine systematische Herangehensweise an die Forschungsfragenstellungen dieses Themenkomplexes soll mit dieser Arbeit für den deutschen Eisenbahnverkehr ein Beitrag geleistet werden.

3 Menschliche Zuverlässigkeit in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr

Auf dem Weg zu einer Analytik zur Betrachtung menschlicher Einflussfaktoren in Sicherheitsanalysen werden in diesem Kapitel die wesentlichen Randbedingungen im Bereich der menschlichen Zuverlässigkeit sowie im Bereich der Verlässlichkeitsbetrachtungen erläutert. Es handelt sich also um eine Verknüpfung der im vorherigen Kapitel erläuterten Human factors im Eisenbahnverkehr mit den Aspekten der Sicherheit. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit bzw. die Wahrscheinlichkeit *menschlicher Fehler*. Kurzfassungen dieses Teils sind in [48] sowie [157] erschienen. Eine mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2 gekoppelte Publikation repräsentiert Quelle [65].

Eine Aufarbeitung des Themenkomplexes menschlicher Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr und Analysemöglichkeiten im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen ist – außerhalb der genannten Publikationen, die Vorläufer zur vorliegenden Arbeit sind – in dieser Form und im vorliegenden Umfang bisher nicht veröffentlicht worden. Der wissenschaftliche Beitrag dieses Kapitels liegt daher neben einzelnen Weiterentwicklungen in erster Linie in dem Zusammentragen und Aufbereiten der zugehörigen Informationen und dem *Bewerten* existierender Ansätze auf ihre Tauglichkeit für den Eisenbahnverkehr.

Im ersten Teil dieses Kapitels (Abschnitt 3.1) werden die Grundlagen der Sicherheitstechnik sowie die normativen Randbedingungen erläutert. Im anschließenden zweiten Teil werden Grundlagen und Begrifflichkeiten der menschlichen Leistungsfähigkeit, existierende Einteilungen menschlicher Fehler dargelegt. Das Zusammenspiel zwischen Sicherheit und *Human factors* speziell im Eisenbahnverkehr sowie existierende Analyseansätze aus der Literatur sind Gegenstand des dritten Teils (Abschnitte ab 3.4). Hier werden ebenso Daten und Verfahren zur Quantifizierung menschlicher Fehler bezüglich ihrer Tauglichkeit im Eisenbahnverkehr analysiert. Es wird nachgewiesen, dass viele Verfahren einige systematische Nachteile aufweisen.

3.1 Verlässlichkeitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr

Bevor der Fokus auf die menschliche Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr gelegt werden kann, müssen in diesem Abschnitt zunächst die Grundlagen erläutert werden, wie Verlässlichkeit und Sicherheit im Eisenbahnverkehr definiert sind und wie sie gehandhabt werden. Schließlich wird herausgearbeitet, welche normativen Vorgaben für die Integration menschlicher Faktoren in Verlässlichkeitsbetrachtungen bestehen.

Der deutsche Sicherheitsbegriff wird in zwei Bereiche unterschieden:

- Sicherheit im Sinne von *safety* bezieht sich auf die Eigenschaften eines Systems, nicht absichtlich herbeigeführte, unerwünschte Ereignisse abzuwehren. Es handelt sich also um eine Sicherheit, die das System *von sich aus* aufweist.
- Sicherheit im Sinne von *security* kennzeichnet die Fähigkeit eines Systems, absichtlich herbeigeführte, unerwünschte Ereignisse abzuwehren. Diese Eigenschaft bezieht sich also auf Sicherheitsmechanismen gegen Gefährdungen *von außen*.

In den folgenden Betrachtungen wird der Schwerpunkt auf die Sicherheit im Sinne des englischen Begriffes *safety* gelegt. Im Eisenbahnverkehr ist diese Sicherheit als das Nichtvorhandensein eines unzulässigen Schadensrisikos definiert [32]. Ein *Risiko* wird als die Kombination einer Auftretenswahrscheinlichkeit einer Gefahr und der Schwere des verursachten Schadens beschrieben. Die *Zuverlässigkeit* ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Einheit ihre geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für eine gegebene Zeitspanne erfüllen kann.

Die Sicherheit eines Systems wird auf dem Weg des vorgeschriebenen, risikobasierten Ansatzes gestaltet. Dazu werden die Auftretenswahrscheinlichkeiten oder die verursachten Schäden einzelner Gefahren durch nachzuweisende Sicherheitsvorkehrungen bzw. -maßnahmen soweit reduziert, bis die zugeordneten Risiken so gering sind, dass das vom Gesamtsystem ausgehende Risiko allgemein akzeptiert werden kann. Das Vorgehen zur Einschätzung, Herstellung und zum Nachweis der Sicherheit wird durch Normen und Vorschriften geregelt.

Durch die Einführung der so genannten *CENELEC-Normen* [32], [33], [34] wurde das vorherige nationale Vorgehen bei Verlässlichkeits- und insbesondere Sicherheitsbetrachtungen durch einen europäisch harmonisierten, risikobasierten Ansatz abgelöst. Die drei Normen zielen auf eine Vereinheitlichung des Prozesses ab, mit der die *Verlässlichkeit* des Eisenbahnsystems erreicht wird. Die Verlässlichkeit be-

steht dabei aus dem Quartett Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (engl. Reliability, Availability, Maintainability, Safety; RAMS). Im Bezug auf Sicherheit handelt es sich bei den Normen und insbesondere der DIN EN 50129 um eine eisenbahnspezifische Anpassung der Sicherheitsnorm DIN EN 61508 [36].

Neben den Normen haben auch die *Common Safety Methods*, die durch die Europäische Eisenbahnagentur erarbeitet werden, verbindlichen Charakter für das Risikomanagementverfahren im Schienenverkehr. Zentrale Bausteine sind dabei die EU-Richtlinie 352/2009 [47] sowie die Erläuterungen der Europäischen Eisenbahnagentur (ERA) [46]. Als Grundsätze für die Risikoakzeptanz sind demnach abhängig von speziellen Kriterien drei Vorgehensweisen möglich:

- Anwendung der anerkannten Regeln der Technik
- Vergleich mit ähnlichen Systemen
- explizite Risikoabschätzung

Die Maßgabe mindestens gleicher Sicherheit, also der Vergleich mit bestehenden Systemen, findet sich auch in der nationalen Eisenbahnbetriebsordnung [40] sowie zusammen mit der Anwendung der anerkannten Regeln der Technik in der ebenso nur deutschlandweit gültigen BOStrab [16]. Insbesondere bei der expliziten Risikoabschätzung kommt einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten und damit auch der menschlichen Zuverlässigkeit mangels Referenzdaten eine große Bedeutung zu. Eine wesentliche Rolle spielen diese Daten jedoch auch bei den anderen Grundsätzen.

Die Norm DIN EN 50126-1 [32] beschreibt einen Prozess für das Management von RAMS-Anforderungen über den Lebenszyklus eines Eisenbahnsystems hinweg. Sowohl eine Reihe von technischen als auch eine Menge von menschlichen Einflussgrößen beeinflussen die Verlässlichkeit des Systems. Die menschlichen Faktoren, die in allen Phasen des Lebenszyklus auftauchen, sollen beim Management der RAMS-Anforderungen besonders berücksichtigt werden:

„(4.4.2.3) Eine Analyse von menschlichen Einflussfaktoren im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die RAMS-Eigenschaften eines Systems ist Bestandteil des ‚Systems Approach‘, der von dieser Norm gefordert wird.“

Obwohl die Norm die Einbeziehung der menschlichen Faktoren besonders hervorhebt, wird in Abschnitt 4.4.2 lediglich eine Liste möglicher Themen angegeben. Die reine Aufzählung wird mit später in dieser Arbeit entwickelten Modellen strukturiert. Des Weiteren werden zur Darstellung in der Norm Ursache-Wirkungs-Diagramme

empfohlen. In jedem Fall sollen die menschlichen Faktoren *mindestens in qualitativer Weise* in die Verlässlichkeitsbetrachtungen integriert werden. In dieser Arbeit wird im Wesentlichen das Zusammenspiel zwischen menschlichen Einflussgrößen und der *Sicherheit* betrachtet. Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit werden in größerem Maße von technischen Faktoren oder von menschlichen Faktoren auf eine indirekte Weise beeinflusst. Für diese Kenngrößen spielen der Entwickler im Gestaltungsprozess oder Instandhaltungspersonal während der Betriebsphase eine Rolle, letztere häufig auch mit einem Anteil physischer Arbeitstätigkeiten. Diese Zusammenhänge können Gegenstand künftiger Arbeiten sein.

Die Norm DIN EN 50129 macht Vorgaben für Sicherheitsbetrachtungen für Eisenbahnanwendungen. Insbesondere schreibt sie quantitative Risikoanalysen für sicherheitsrelevante elektronische Systeme der Signaltechnik vor. Der Prozess beginnt mit den folgenden Schritten:

1. Systemdefinition
2. Gefährdungsidentifikation
3. Konsequenzanalyse
4. Risikoabschätzung
5. Zuordnung von zulässigen Gefährdungsraten (Tolerable Hazard Rates; THR)
6. Gefährdungsbeherrschung

Nach der Bestimmung der THR müssen im Gestaltungs- und Fertigungsprozess die Gefährdungen beherrscht werden. Das bedeutet, die tatsächliche Gefährdungsrate einer sicherheitsrelevanten Funktion darf nicht höher als die entsprechende THR sein. Es muss im Sicherheitsnachweis also dokumentiert werden, dass das Teilsystem so ausgelegt wurde und gefertigt wird, dass es die zuvor festgelegten Sicherheitsanforderungen erfüllt.

Der vorgeschriebene Risikoanalyseprozess wird in der Regel methodisch unterstützt, z.B. mit Techniken wie der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis; FMEA), der Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis; FTA)(beide z.B. siehe [35]), Best-Practice-Risk [13], [17] oder dem Risikographen [108]. Insbesondere im Sicherheitsnachweis eines Herstellers wird häufig die Fehlerbaumanalyse angewendet. In dieser Methode werden die Ausfallraten einzelner Komponenten in einer Baumstruktur miteinander verknüpft und verrechnet, um die Gefährdungsrate des gesamten Teilsystems zu bestimmen.

Die Zuverlässigkeit von technischen Komponenten und Bauteilen kann für die Fehlerbaumanalyse in den meisten Fällen hinreichend gut geschätzt werden. Sie wird üblicherweise durch eine Ausfallrate oder der resultierenden Gefährdungsrate beschrieben. In der Fehlerbaumanalyse treten häufig neben Funktionen technischer Komponenten auch Tätigkeiten menschlicher Bediener auf. Das zentrale Problem besteht darin, dass die Rate des Ausbleibens der korrekten menschlichen Handlung nicht bekannt ist. Mit anderen Worten, der Ausfall der Systemkomponente Mensch kann nicht einfach modelliert und abgeschätzt werden. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler ist eine äußerst komplexe Angelegenheit, die bis heute noch nicht vollständig zufriedenstellend gelöst ist. Wahrscheinlichkeiten müssen außerdem erst über die Hinterlegung eines Betriebsszenarios in Ausfallraten, also z.B. Ausfälle pro Betriebsstunde, überführt werden. Die Schwierigkeiten, die Wahrscheinlichkeit für menschliche Fehler anzugeben, werden ausführlich in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels diskutiert. Wesentliche Aspekte für die Komplexität sind unter anderem

- die großen Streuung menschlicher Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Situation,
- das zielgerichtete und nicht funktionsgerichtete Handeln des Menschen,
- die große Diversität der Mensch-Maschine-Interaktionen,
- das große Spektrum menschlicher Handlungen und menschlicher Fehler, das mit einer binären Beschreibung der Funktionsausübung nicht ausreichend modelliert wird,
- die Schwierigkeiten, Schätzungen mit realen Daten zu validieren.

Die Komplexität, Werte für die menschliche Zuverlässigkeit zu erhalten, spiegelt sich in deutlicher Weise in der Praxis wieder. Risikoanalysen konzentrieren sich oft auf den technischen Systemanteil, ohne den Triebfahrzeugführer, den Fahrdienstleiter oder andere Bediener sorgfältig abzubilden. Manche Betrachtungen enden schlicht an der Mensch-Maschine-Schnittstelle. In anderen Risikoanalysen wird angenommen, dass der menschliche Bediener seine Aufgaben stets fehlerlos ausführt. Oft werden die Bedienhandbücher schrittweise um Anweisungen ergänzt, wie der menschliche Bediener ein technisches System zu überwachen und auf technische Fehler zu reagieren hat, s.a. [41]. Allerdings berücksichtigen diese Handbücher nicht, inwiefern der Mensch in der Lage ist, diesen Anweisungen Folge zu leisten oder wie viele Fehler er dabei möglicherweise macht. Einen Ansatzpunkt dafür können arbeitspsychologische Methoden liefern [62].

Diese Auswege, die in aktuellen Sicherheitsbetrachtungen anzutreffen sind, beschreiben die menschlichen Handlungen in nicht adäquater Art und Weise. Hier entsteht ein Risiko, auf der Basis einer nicht fundierten Vorgehensweise die Sicherheit des betrachteten Teilsystems zu überschätzen.

Aus Sicht der Anforderungen für die Integration menschlicher Faktoren in Betrachtungen zur Systemverlässlichkeit (DIN EN 50126-1) muss außerdem hervorgehoben werden, dass die Einbeziehung der menschlichen Bedienhandlungen in einer Fehlerbaumanalyse nur eine sehr stark fokussierte Methode repräsentiert. Mit anderen Worten, finden die menschlichen Faktoren lediglich in einem Ast der Fehlerbaumanalyse Eingang in die Sicherheitsbetrachtungen, wird der Mensch sehr funktionsorientiert analysiert und ein großes Spektrum menschlichen Einflusses außen vor gelassen.

Aufgrund der großen Bedeutung, die die Fehlerbaumanalyse für die Praxis hat, werden im Folgenden dennoch zum einen Lösungen für diese Problemstellung erarbeitet. Zum anderen werden im folgenden Kapitel Ansätze vorgestellt, mit denen die menschlichen Faktoren künftig in geeigneter Weise in Verlässlichkeitsbetrachtungen integriert werden können, wie von DIN EN 50126-1 vorgeschrieben.

3.2 Menschliche Zuverlässigkeit und menschliche Fehler

In diesem Abschnitt werden zunächst die wichtigsten Grundlagen zur *menschlichen Zuverlässigkeit* erläutert. Klassifikationen *menschlicher Fehler* folgen im Anschluss.

Eine zentrale Definition menschlicher Zuverlässigkeit im deutschsprachigen Raum ist in der VDI-Richtlinie 4006 zu finden [182]. Eine ganz ähnliche Beschreibung geben auch GIESA ET TIMPE [54].

„Die menschliche Zuverlässigkeit beschreibt die Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall im Akzeptanzbereich durchzuführen.“

Abweichungen von dieser geforderten Verhaltensweise sind *Fehler*. Über sie wird die menschliche Handlungszuverlässigkeit operationalisiert. Die Definition für *menschliche Fehler* umfasst entsprechend jede menschliche Handlung, die die gesetzten Akzeptanzgrenzen überschreitet [182]. In den VDI-Richtlinien wird auch von *Arbeitsfehlern* gesprochen.

Diese moderne Sicht bietet gegenüber dem binären Verständnis von menschlicher Zuverlässigkeit und menschlicher Fehler eine deutlich breitere Perspektive. Klassischerweise wurde die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers als das Verhältnis aus menschlichen Fehlhandlungen zur Gesamtheit der angeforderten Handlungen definiert (*HEP* : *Human Error Probability*). Ein Schätzwert ließe sich erhalten, wenn man die Anzahl der Fehlhandlungen bei einer möglichst großen Zahl von Versuchen angeben kann. So wurde menschliche Zuverlässigkeit häufig auch mathematisch als das genaue Gegenteil menschlicher Fehler angesehen ($1 - HEP$). Dieses Verständnis begünstigte eine binäre Denkweise von lediglich Auslassung oder richtiger Ausführung, wobei das Spektrum menschlicher Verhaltensweisen deutlich umfangreicher ist. Menschen reagieren nicht – wie Maschinen – funktional auf eine Anfrage. Der Unterschied der menschlichen Zuverlässigkeit gegenüber der technischen Zuverlässigkeit besteht nach der oben angegebenen Definition in drei Punkten. Erstens wird nicht von einer Wahrscheinlichkeit, sondern einer Fähigkeit gesprochen. Zweitens handelt es sich bei der Ausführung nicht um eine Funktion, sondern eine Aufgabe, die auch menschlich zielorientiert statt prozessorientiert durchgeführt werden kann. Drittens muss sie „nur“ im Akzeptanzbereich ausgeführt werden.

Eine andere, häufig anzutreffende Definition für menschliche Fehler bezieht sich nicht auf die Abweichungen von einer geforderten Verhaltensweise, sondern auf die Folgen für das System. Sie weist damit gegenüber der oben genannten, arbeitspsychologischen Denkweise eine ingenieurtechnische Perspektive auf. Sie ist unter dieser Prämisse auch für die vorliegende Arbeit gültig und lautet:

„Menschlicher Fehler: menschliche Handlung, die zu einem ungewollten Verhalten des Systems oder zu einer Fehlfunktion führen kann.“
([34], Abschnitt 3.1.24)

In der deutschen Fassung der DIN EN 50129 wird der englische Begriff *Human error* mit *menschlichem Versagen* übersetzt. Menschliches Versagen ist in der deutschen Sprache jedoch negativ besetzt und wird häufig in der Presse in unzulänglicher Weise als Unfallursache gegenüber technischem Versagen genannt. Diese Benennung soll daher hier nicht weiter verwendet werden.

Da in allen Industrien trotz vielerorts anzutreffender Automatisierung sicherheitsrelevante menschliche Tätigkeiten fortbestehen, sind für *menschliche Fehler* viele Forschungsansätze zu finden. Die Literatur, die sich diesem Thema, jedoch nicht konkret seiner Anwendung im Eisenbahnverkehr, widmet, ist zu umfangreich für eine

kompakte Zusammenfassung in dieser Arbeit. Es können daher nur die wichtigsten Modelle dargestellt werden.

Eine Möglichkeit zur Einteilung menschlicher Fehler wird z.B. von HINZEN verwendet [77]. Dort werden die Fehlermöglichkeiten nach der Phase der Informationsverarbeitung unterschieden:

- Fehler bei der Wahrnehmung der Information (Erkennungsfehler)
- Fehler bei der Verarbeitung der Information (Entscheidungsfehler)
- Fehler bei Reaktion auf die Information (Leistungsfehler)

Die genannte Dreiteilung ist jedoch nicht einwandfrei, da sich menschliche Informationsverarbeitung nicht immer durch die genannten drei Schritte modellieren lässt. Insbesondere bei Tätigkeiten mit kognitivem Anteil ist die Entscheidung und Zielbildung komplexer als es eine Modellierung durch einen einzelnen Systembaustein *Verarbeitung* zulässt [168].

Eine andere Dimension zur Kategorisierung menschlicher Fehler basiert auf einer Einteilung des Verhaltens in Abhängigkeit von der Komplexität der zu erledigenden Aufgabe. Die Grundlage hierfür bietet das Drei-Ebenen-Modell menschlichen Verhaltens von RASMUSSEN [134]. Fertigkeitsbasiertes Verhalten tritt meist bei oft ausgeübten Aufgaben auf, für deren Bearbeitung nur ein geringer Grad von bewusster Denktätigkeit erforderlich ist. Regelbasiertes Verhalten ist typisch bei weniger vertrauten Aufgaben, bei denen mit Hilfe normaler Erfahrung ein Wenn-Dann-Prozess abläuft. Wenn eine hohe Denktätigkeit erforderlich ist, also vertraute Muster und Regeln nicht direkt angewendet werden können, spricht man von wissensbasiertem Verhalten (Definitionen nach [182]). Die kognitiven Abläufe in fertigkeitsbasiertem, regelbasiertem und wissensbasiertem Verhalten unterscheiden sich, da verschiedene Prozessschritte durchlaufen werden. Dargestellt sind die Abläufe in Abbildung 3.1.

Die am weitesten verbreitete Einteilung menschlicher Fehler ist die Klassifikation von REASON [135], dargestellt in Abbildung 3.2. Es werden sowohl die kognitive Entstehung des Fehlers, als auch seine letztendliche Ausprägung betrachtet. Es wird erstens nach absichtlichen und unabsichtlichen Handlungen unterschieden und zweitens das Modell von RASMUSSEN integriert. Der Begriff *Fehler* wird hier nur für falsche Handlungen bei prinzipiell richtiger Absicht verwendet. Bemerkenswert ist, dass Tätigkeiten (und entsprechend Fehler) regel- und wissensbasierten Verhaltens hier lediglich beabsichtigten Handlungen zugeordnet werden. Entsprechend gehört die Ebene fertigkeitsbasierten Verhaltens zu unbeabsichtigten Handlungen.

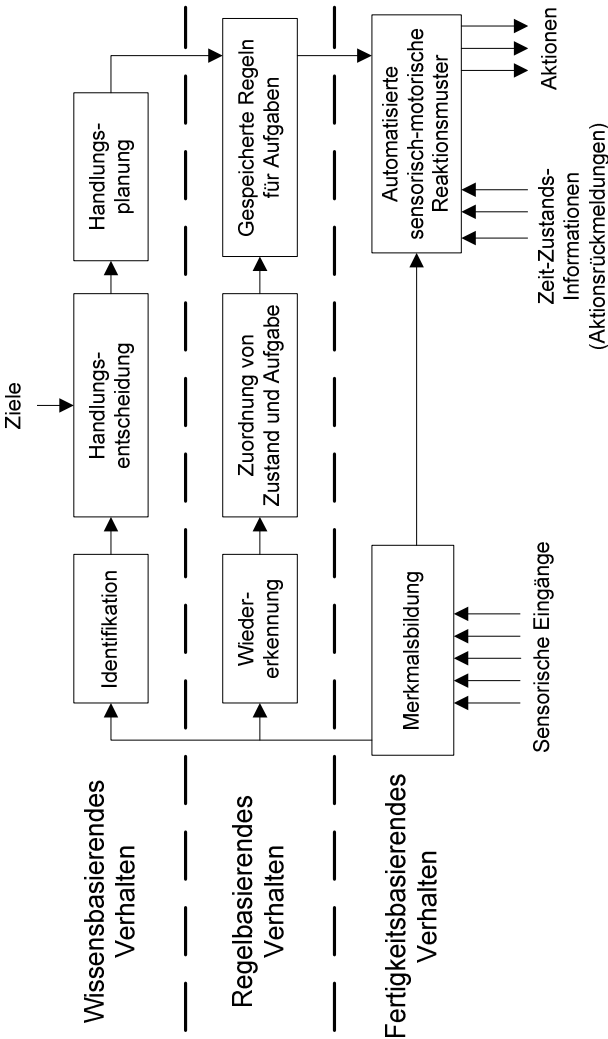


Abbildung 3.1: RASMUSSENS Modell verschiedener Ebenen menschlichen Verhaltens und Informationsverarbeitung (Darstellung aus [3])

Die Unterscheidung zwischen Patzern und Schnitzern erfolgt nach dem Kriterium, ob die Handlung während der Durchführung misslingt oder ausbleibt oder sie durch Ablenkung oder Vergessen ausgelassen wird. Es ist unabhängig von REASONS Modell im übrigen grundsätzlich richtig, dass absichtliche gegenüber versehentlichen Fehlern mit anderen Ansätzen adressiert werden müssen. Die zugrunde liegenden Phänomene weisen andere Ursachen auf.

Die bestehenden Klassifikationen unterteilen Fehler also nach verschiedenen Gesichtspunkten und geben eine Übersicht über das Spektrum menschlichen Verhaltens und zugehörigen Fehlhandlungen. Eine wesentliche Unterscheidung, die für die Analyse menschlicher Fehler ganz zentral ist, wird jedoch bei einigen Klassifikationen nicht präzise genug vorgenommen. Es handelt sich um die Unterscheidung zwischen *ursachen-* und *auftrittensorientierter* Betrachtung. Eine ursachenorientierte Herangehensweise an menschliche Fehler hinterfragt die Gründe für eine letztlich beobachtbare Fehlhandlung. Die auftrittensorientierte Betrachtung klassifiziert menschliche Fehler nach ihrer Ausprägung – mit anderen Worten, die Fragestellung lautet, was an der Ausführung fehlerhaft ist. Diese Unterscheidung wird im englischen durch die Trennung zwischen *phenotypes* (Auftrittsarten) und *genotypes* (Ursachenarten/Gründe) getroffen [80].

Alle drei zuvor geschilderten Modelle bzw. Klassifikationen weisen in diesem Bereich Schwächen oder Risiken auf. Während in der Dreiteilung in Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsfehler den ersten beiden Kategorien eine ursachenorientierte Herangehensweise zugrundeliegt, bezieht sich die Bezeichnung Handlungsfehler bereits auf die falsche Ausprägung der menschlichen Handlung. Die letzte Kategorie besitzt also eine auftrittensorientierte Betrachtung und dieses einfache Modell vermischt insgesamt verschiedene Herangehensweisen.

Die Klassifikation menschlicher Verhaltensweisen von RASMUSSEN besitzt grundsätzlich eine ursachenorientierte Fragestellung. Dieses Modell darf nicht nachträglich mit einer auftrittensorientierten Klassifikation verknüpft werden, in dem etwa das Auslassen einer Regel oder die falsche Bedienung eines Instruments verschiedenen Verhaltens- bzw. Fehlerebenen zugeordnet wird. Überdies sind z.B. fertigkeitssichernde Handlungen nicht grundsätzlich weniger fehleranfällig als regelbasierte Handlungen.

Die Popularität der Klassifikation menschlicher Fehler von REASON darf nicht darüber hinweg täuschen, dass in diesem Modell ursachen- und auftrittensorientierte Betrachtungsgrundlagen nicht präzise voneinander getrennt sind. Zur Erläuterung

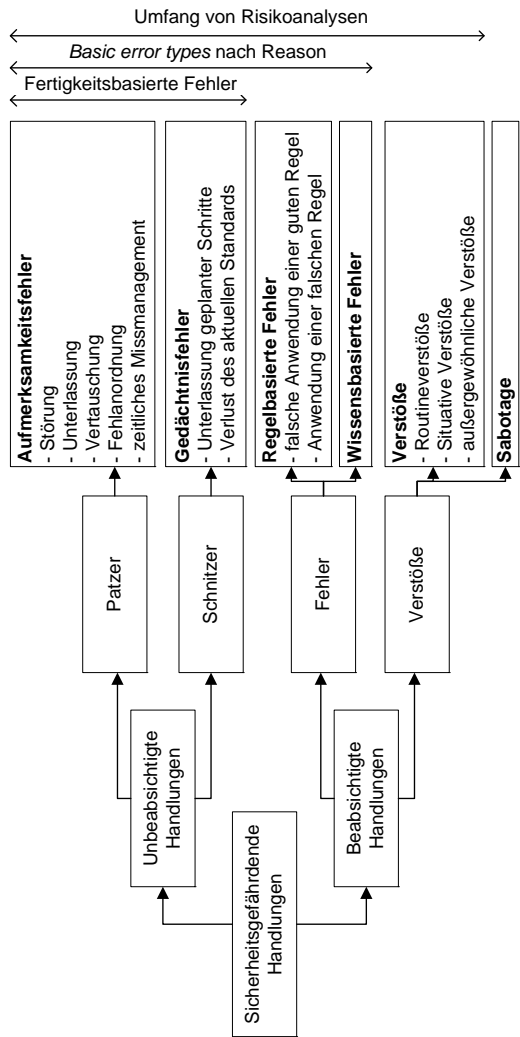


Abbildung 3.2: Klassifikation menschlicher Fehler nach REASON [135], geringfügig erweitert auf der Basis von ANDERS [3]

mag folgendes Beispiel dienen: die Bezeichnung der Kategorie Aufmerksamkeitsfehler besitzt eine ursachenorientierte Fragestellung: ein Fehler in der Aufmerksamkeit ist die *Ursache* für einen *Patzer*. Die darunter angeordneten Punkte Unterlassung und Vertauschung beschreiben jedoch eindeutig die Ausprägung einer menschlichen Handlung, besitzen also eine auftretensorientierte Basis. Eine Unterlassung, Vertauschung oder Fehlanordnung kann ganz genauso ein Verstoß oder eine Sabotage sein. Unterlassung wird darüber hinaus bei Gedächtnisfehlern genannt, könnte jedoch auch als Anwendung einer falschen Regel bei regelbasierten Fehlern passieren. Die Vermischung dieser grundverschiedenen Betrachtungsweisen bei der Modellierung von REASON wird bereits 1993 von HOLLNAGEL beschrieben [80]. Wegen dieser Schwäche wird – trotz der hohen Verbreitung der Klassifikation – dieses Modell in dieser Arbeit nicht weiter verwendet, und der Anwender sollte die Tauglichkeit dieses Ansatzes für seine Zwecke genau prüfen.

Im Bereich der auftretensorientierten Klassifikationen ist die Unterscheidung von *Auslassungsfehlern* (errors of omission) und *Ausführungsfehler* (errors of execution; *nicht* errors of commission) üblich. Auslassungsfehler bestehen schlicht aus Unterlassung der erforderlichen Handlung. Eine Durchführung der Handlung, die mindestens in einer Ausprägung falsch oder fehlerhaft ist, wird als Ausführungsfehler bezeichnet. Die wichtigsten Beispiele von Ausführungsfehlern gibt folgende Liste (nach [81] und [183]):

- falscher Zeitpunkt (Ausführung zu früh, zu spät)
- falsche Dauer (zu kurz, zu lange)
- falsche Intensität (zu wenig, zu viel, zu niedrig, zu hoch)
- falsche Geschwindigkeit (zu schnell, zu langsam)
- falsche Distanz (zu nah, zu weit entfernt)
- falsche Dimension (falsche Richtung, falsche Orientierung)
- falsche Reihenfolge
- falsche Auswahl
- fehlerhafte Einstellung
- Verwechslung (Unterlassen und Falschwahl)

Bei der Einteilung menschlicher Fehler kann eine weitere Differenzierung vorgenommen werden, die der bereits erläuterten Unterteilung in ursachen- und auftretensorientierte Herangehensweisen ähnelt. Wird das menschliche Verhalten als solches und ohne Kopplung mit dem Gesamtsystem betrachtet, handelt es sich um eine Analyse der so genannten *Verhaltensebene*. Der Fokus liegt also auf den kognitiven Prozessen beim menschlichen Bediener. Im Gegensatz dazu lautet die zentrale Frage

der Betrachtung auf der *Mensch-Maschine-Ebene*: Welches Ergebnis hat die menschliche Handlung in der speziell vorliegenden *Situation*? Die Entscheidung über eine richtige oder fehlerhafte Handlung liegt letztendlich auf dieser Situationsebene. Diese Ebene muss die Grundlage für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit sein, da in der Situation die resultierenden Folgen registriert werden. Bedeutsam ist die Unterscheidung der beiden Ebenen, da es Handlungen gibt, die zwar keine Fehler auf der Verhaltensebene sind (etwa weil der Mensch in gutem Glauben handelt), in der vorliegenden Situation, also auf Mensch-Maschine-Ebene, jedoch fehlerhaft sind. Es handelt sich um so genannte *errors of commission*. Die Bedeutung dieses Fehlertyps in sicherheitsrelevanten Systemen neben der Aufteilung in beabsichtigte und unbeabsichtigte Handlungen sowie Ausführungs- und Auslassungsfehlern ist in den Forschungen zur menschlichen Zuverlässigkeit erst spät erkannt worden, ein Überblick z.B. in [166].

Errors of commission umfassen menschliche Handlungen, die aus Sicht des Systems zu diesem Zeitpunkt nicht erforderlich sind und die Szenarienentwicklung negativ beeinflussen (in Anlehnung an [168]). Weiter gefasste Definitionen des Phänomens *error of commission* (wie z.B. bei REER ET AL. [140]) sind weniger praktikabel für eine anschließende Klassifikation. Es muss hervorgehoben werden, dass *errors of commission* in dieser Arbeit somit erstens nicht als Gegenteil von Auslassungsfehlern (*errors of omission*) zu verstehen sind, sie umfassen nicht nur die fehlerhafte Ausführung einer vom System verlangten Handlung (Ausführungsfehler). *Errors of commission* sind auch zweitens nicht ausschließlich die fehlerhaften Bedienungen, wenn eine Unterlassung das richtige Verhalten wäre. Diese Fehlerart ist in den zuvor vorgestellten, klassischen Klassifikationen menschlicher Fehler nicht enthalten.

Aufgrund der bisherigen Vermischung von Ursachenarten und Auftretensarten menschlicher Fehler zum einen und zur systematischen Integration der *errors of commission* zum anderen erscheint ein neuer Zugang zur Klassifikation menschlicher Fehler nötig. Für eine sorgfältige Modellierung menschlicher Handlungsmöglichkeiten und zur weiteren Analyse menschlichen Einflusses in technischen Systemen wird in Kapitel 4 ein tabellarisches Modell menschlicher Verhaltensweisen entwickelt. Es integriert die ursachen- und auftretensorientierten Herangehensweisen und berücksichtigt sowohl Auslassungs- und Ausführungsfehler als auch *errors of commission*.

Über die bisherigen, fehlerfokussierten Betrachtungen hinaus können menschliche Handlungen auch positive Effekte auf die Sicherheit haben. Menschen können gemachte Fehler selbst erkennen und – unter Umständen ohne Auswirkungen auf das

Gesamtsystem – wieder beheben. Eine besondere Stärke menschlicher Informationsverarbeitung ist auch die Reaktion auf gänzlich unvorhergesehene Situationen. Befindet sich das System in einem instabilen, jedoch dem Bediener völlig unbekannten Zustand, hat der Mensch eventuell die Möglichkeit, unter Umgehung anderer Sicherheitssysteme dennoch einen sicheren Zustand herbeizuführen. Ein Beispiel für eine heroische Handlung in einer so genannten *beyond-design-basis*-Situation wäre ein Triebfahrzeugführer, der sämtliche Zugsicherungssysteme deaktiviert und eine möglichst hohe Geschwindigkeit fährt, um den Zug vor einer herannahenden Flutwelle zu retten. Diese beiden Tätigkeitsphänomene, Fehlerbehebung und Reaktion in unbekannten Situationen, sind in einer prospektiven Betrachtung menschlicher Handlungen in einem sicherheitskritischen System jedoch schwer greifbar.

Der Abschnitt hat gezeigt, dass menschliche Fehler sehr vielschichtig auftreten und nicht leicht zu beschreiben sind. Die große Variabilität menschlicher Handlungen hat in der Forschung auch zu der Erkenntnis geführt, dass eine rein negative, eben auf die wahrscheinlichen *Fehler* bezogene, Sichtweise langfristig nicht zielführend ist, sondern das ganze Tätigkeitsspektrum beachtet werden muss. Zweitens wird davon Abstand genommen, menschliche Fehler rein als Unfallursache zu verstehen. Die moderne Fehlerforschung hebt hervor, dass menschliche Fehler nicht der *Auslöser* für Fehlfunktionen sind, sondern als *Symptom* für organisatorische und technische Fehler im Hintergrund des Systems verstanden werden sollten [24].

3.3 Menschliche Fehler im Eisenbahnsystem

Bereits 1977 wird hervorgehoben, dass die ausgewogene Systemgestaltung hinsichtlich der Sicherheit des Bahnverkehrs eine zentrale Bedeutung hat [159]:

„Das Mensch-Maschine-System *als Ganzes* hat die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Optimale Lösungen berücksichtigen das Zusammenspiel von Mensch und Technik und sie beachten die gegenseitigen Abhängigkeiten der Komponenten.“ (Hervorhebung v. Verf.)

Die Gestaltung der technischen Systeme den menschlichen Fähigkeiten anzupassen, ist zentral, um Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Eisenbahnsystems zu gewährleisten. Je nach Quelle werden 40 bis 90 Prozent der Eisenbahnunfälle menschlichen Fehlern zugeschrieben (z.B. Großbritannien und Skandinavien [4], [29], Japan [174]). Dass der menschliche Fehler eine große Rolle spielt, wird auch durch ANDERS hervorgehoben [2], BRABAND geht sogar davon aus, dass das Risiko

menschlicher Fehler um den Faktor 100 bis 10.000 über dem Risiko technischen Versagens liegt [17]. Nur 3 % der Eisenbahnunfälle der Schweiz 2009 sind auf technische Defekte zurückzuführen, bei allen anderen spielen menschliche Faktoren eine Rolle, wobei allerdings beachtet werden muss, dass es sich dabei nicht nur um Fehler des Personals handelt, sondern auch der menschliche Einfluss Dritter (also auch Fahrgäste und Selbstmörder) wesentlich sein kann [21].

Trotz dieser Erkenntnisse existiert zu menschlichen Fehlern *im Eisenbahnsystem* bzw. der Analyse des Zusammenspiels zwischen Mensch und Technik hinsichtlich der Sicherheit im kontinentalen Eisenbahnverkehr Europas keine durchgängige Forschung, sondern eher eine gewisse Zahl punktueller Veröffentlichungen. Der Fokus liegt in diesem Abschnitt zunächst auf Publikationen, die Human factors mit Sicherheitsfragestellungen im Eisenbahnverkehr in *qualitativer* Weise verknüpfen. Studien zur *Quantifizierung* menschlicher Fehler zur Integration in Risikoanalysen werden später in diesem Kapitel besprochen.

Die Forschung zu menschlichen Fehlern im Eisenbahnsystem kann als eine Teilmenge der Publikationen zu *Rail human factors* angesehen werden. Da aber jegliche ergonomische Fragestellungen über die menschliche Zuverlässigkeit stets in Verknüpfung mit der Sicherheit stehen, sollen hier entscheidende Quellen des Oberthemas noch einmal kurz genannt werden. Wesentlich sind ein Review von 2003 [78], die Review-Artikel von WILSON ET AL. [192], [195] sowie eine Einführung für die Industrie und die Online-Bibliothek des RSSB [57], [133]. Am Rande sei angemerkt, dass Fahrdienstleiter in den englischsprachigen Quellen unterschiedlich genannt werden, *signalmen*, *signaller*, *station foreman*, *controller* oder *dispatcher*, wobei international nach Zugsicherungsverfahren und nach Bauform des Stellwerks signifikante Unterschiede bestehen können. Eine klare Trennung wird durch die nationale Perspektive vieler Autoren erschwert.

Das wichtigste, deutschsprachige Werk zum Einfluss des Menschen auf die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs ist die Dissertation von HINZEN [77]. Auf der Basis einer Literaturanalyse wird ein Modell entwickelt, das für die menschliche Zuverlässigkeit von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern achtzehn Werte angibt. Die Fehlerrate ist abhängig vom Stresslevel, den Umgebungsbedingungen und der Verhaltensweise nach RASMUSSEN, auf dem sich die relevante Tätigkeit bewegt. Die Analysen von HINZEN sind im einzelnen Gegenstand späterer Abschnitte dieses Kapitels, da die Betrachtungen über qualitative Aussagen hinausgehen.

Es ist nicht leicht, eine generische Liste über häufige oder besonders kritische menschliche Fehler im Eisenbahnverkehr anzugeben. Ein Grund hierfür ist die Heterogenität der inter- und intranationalen Systeme und Betriebsverfahren. Zweitens werden diese Unterschiede durch die langen Lebenszyklen der Fahrzeuge und Stellwerke (und somit auch der Mensch-Maschine-Systeme) begünstigt. Zu einem Betrachtungszeitpunkt existiert also z.B. ein großes Spektrum verschiedener Führerstände. Die Unterscheidung menschlicher Fehler auf höchster Ebene zwischen Fahrzeugsteuerung (Triebfahrzeugführer) und Management der Zugfahrten bzw. Erteilung von Fahrerlaubnissen (Fahrdienstleiter u.ä.) ist jedoch fast immer möglich. Es sei angemerkt, dass hier der konventionelle Fern- und Regionalzugverkehr zwischen Bahnhöfen gemeint ist und spezielle Bedingungen von Rangierfahrten und einfachen Betriebsverfahren bei der Betrachtung nur im Hintergrund stehen. Dieser Fokus wird auch im Fortgang dieser Arbeit gesetzt. Ein dritter Grund für die Schwierigkeiten bei Einteilung menschlicher Fehler im Schienenverkehr sind auch die kontinuierliche Automatisierung und Absicherung menschlicher Handlungen, die bereits dazu beigetragen haben, dass menschliche Tätigkeiten nur noch im Störungsbetrieb oder in einfachen Betriebsverfahren wie dem Zugleitbetrieb direkte Sicherheitsverantwortung besitzen. Durch die verschiedenen technischen Automatisierungssysteme haben sich die menschlichen Tätigkeiten international noch weiter voneinander entfernt.

Eine Identifikation von Fehlermöglichkeiten würde eine genaue Aufgabenanalyse des Tätigkeitsspektrums erfordern. Alternativ wäre eine Ableitung aus Unfalldaten möglich. Zu den methodischen Ansätzen folgen Betrachtungen im folgenden Abschnitt. Trotz der Schwierigkeiten ist in der Literatur eine Liste von generischen Fehlern für den Normalbetrieb zu finden. Typisch seien für Lokführer laut [4] die folgenden Fehler:

- Signalfälle (Überfahren Halt zeigender Hauptsignale; engl. *Signal passed at danger*, SPAD)
- Zu schnelles Fahren
 - gegenüber permanenten Geschwindigkeitsbegrenzungen (Streckengeschwindigkeit)
 - gegenüber vorübergehenden Geschwindigkeitsbegrenzungen (wegen Baustellen oder kurzfristige Langsamfahrstellen)
 - gegenüber fahrstraßenabhängigen Geschwindigkeitsbegrenzungen (z.B. wegen Fahrt in ein Nebengleis)

Mit dem Problem der Signalfälle beschäftigt sich international ein beachtlicher Teil der *Rail human factors*-Forschung – exemplarisch seien drei jüngere Quellen genannt: [147], [197], [198]. Dieses Thema soll im Fortgang dieser Arbeit nicht besonders hervorgehoben werden, da in Deutschland bereits beinahe sämtliche Strecken mit PZB ausgerüstet sind und letzte Lücken nach jüngsten Ereignissen in Kürze geschlossen werden sollen. Eine praktische Kurzübersicht über grundsätzliche Typen europäischer Zugsicherungssysteme findet sich in [4].

Eine Typisierung menschlicher Fehler im Eisenbahnsystem wird auch in einer französischen Betrachtung vorgenommen [59]. Die Klassifikation orientiert sich aber sehr an den Randbedingungen des Eisenbahnsystems in Frankreich und kann daher nicht als allgemein gültig angesehen werden. Die genannte Studie untersucht die Zuverlässigkeit der Bediener nur in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeit – hier in Abhängigkeit des Tagesrhythmus des Menschen und der Dienstplanung. Der vorgeschlagene Ansatz basiert auf Unfalldaten, bietet jedoch zur Integration von menschlichen Einflussfaktoren in Methoden der Sicherheitstechnik und Risikoanalysen entsprechend der CENELEC-Normen keine Lösung.

Ein weiterer Ansatz, der die drei Gebiete Sicherheit, Human factors und Eisenbahnverkehr zusammen zu bringen versucht, ist durch BELMONTE vorgeschlagen worden [11], [12]. Der Einfluss des Mensch-Maschine-Systems am Fahrdienstleiter-Arbeitsplatz auf die Sicherheit des gesamten Verkehrssystems wird analysiert. Nach einer umfassenden Situationsbeschreibung und detaillierten Erläuterung von Besuchen ähnlicher Leitstellen sowie der Versuchsmethodik im Labor SPICA-RAIL entfernt sich die schließlich entwickelte Methodik zur Bewertung des menschlichen Einflusses jedoch recht deutlich von den Vorgaben der CENELEC-Normen und weist darüber hinaus eine hohe Komplexität auf.

Es sei erwähnt, dass aus Großbritannien sehr wohl Publikationen zu finden sind, die über die Einbeziehung von Human factors in den Gestaltungsprozess berichten. Der Term *Human factors integration* ist dort jedoch mehr auf die Integration in das Gefüge des Unternehmens bezogen als auf die Integration von Human factors in Sicherheitsbetrachtungen, z.B. [22], [38].

Insgesamt kann als Zwischenbilanz festgehalten werden, dass zwar Quellen zu Human factors und Sicherheitsbetrachtungen existieren, es fehlt jedoch, insbesondere in einem Teil der britischen Publikationen, ein praxisnaher Bezug zu den CENELEC-Normen, d.h. dem RAMS-Konzept sowie den vorgeschriebenen Risikoanalysen. Der von DIN EN 50126-1 vorgeschriebenen Integration menschlicher Einflussfakto-

ren wird in der Praxis oft ausgewichen [187]. Es gibt also eine Diskrepanz (einen Forschungsbedarf) zwischen genormter Einbeziehung und gelebtem Industrievorgehen. VAN DER WEIDE kritisiert in der zitierten Quelle beispielsweise, dass Human factors im (kontinentalen) Eisenbahnverkehr – wenn überhaupt – mehr auf einer Ad-hoc-Vorgehensweise im Betrieb oder auf Basis einer retrospektiven Analyse berücksichtigt werden.

Aus einer komplexen Sicherheitsbetrachtung für das Bahnsystem ist eine erstmalige Beschäftigung mit menschlichen Fehlern im Eisenbahnsystem bekannt, die auch die Randbedingungen der CENELEC-Normen berücksichtigt [2], [3]. Dort werden zum einen das Modell menschlichen Verhaltens nach RASMUSSEN und zum anderen die Einteilung sicherheitsgefährdender Handlungen nach REASON zur Beschreibung des Einflusses des Menschen auf das Eisenbahnsystem herangezogen. ANDERS liefert außerdem eine Überarbeitung des Modells der Einflussfaktoren auf die Systemverlässlichkeit (nach DIN EN 50126-1), das die menschlichen Faktoren in den Vordergrund setzt. Dargestellt ist eine Baumstruktur, die nach unten hin eine feinere Aufgliederung der Einflüsse vornimmt. Löst man die strikte Trennung in korrekte und falsche menschliche Handlungen auf, erhält man die Darstellung in Abbildung 3.3. Es wird deutlich, dass menschliche Faktoren nicht nur im Betrieb und in der Instandhaltung, sondern ebenso im Entwurfsprozess des Systems auftauchen. Menschliche Fehler in der Gestaltungsphase erscheinen als systematische Fehler in der Phase *Betrieb und Instandhaltung*.

Nur ein Teil der Fehler in der Phase *Betrieb und Instandhaltung* sind *aktive Fehler*, also Handlungen durch Personen direkt an der Mensch-Maschine-Schnittstelle, die unmittelbar ein Stör- oder Unfallgeschehen zur Folge haben (Definition nach [182]). Menschliche Fehler im Hintergrund der Phase *Betrieb und Instandhaltung* zum einen, und in der vorherigen Gestaltungsphase zum anderen, repräsentieren *latente Fehler*, die vor einem möglichen, unerwünschten Ereignis unentdeckt bleiben. Sie können trotz ihrer räumlichen und zeitlichen Trennung für die Auslösung des Vorkommnisses mit bedingend sein.

Betrachtungen zur Verlässlichkeit müssen alle genannten Einflüsse des Menschen einbeziehen. In den verschiedenen Phasen sind mehrere Parteien involviert: der Arbeitsplatz der Bediener, die direkt im und am laufenden Betrieb arbeiten, wird von den Gestaltern und Entwicklern des Systems genauso beeinflusst wie vom Arbeitgeber (also den Vorgesetzten des Bedieners) und dem Bediener selbst. Alle diese Parteien gestalten damit das Risiko des letztendlichen Arbeitsplatzes im Betrieb, tragen jedoch genau mit dieser Gestaltung auch einzelne Risiken in diesen

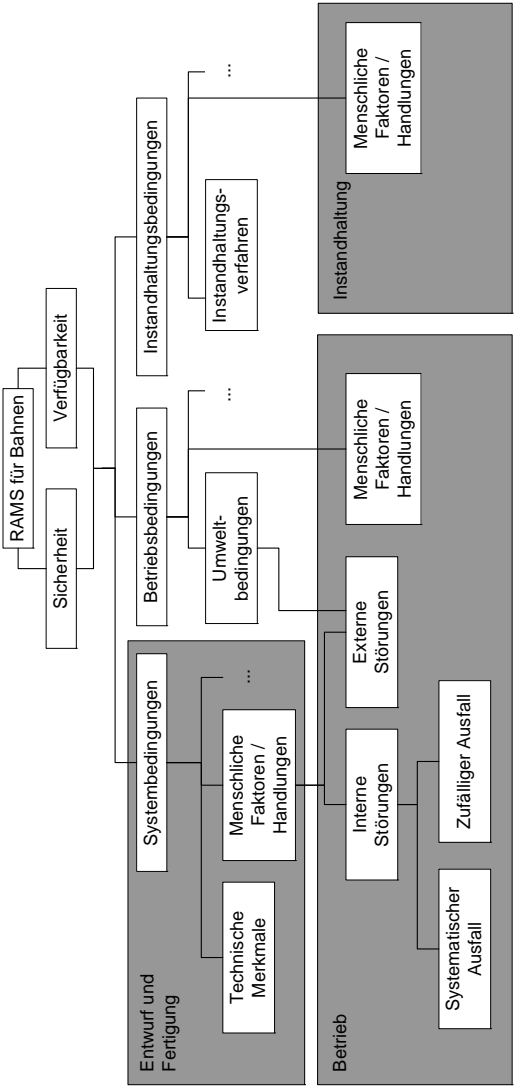


Abbildung 3.3: Menschliche Einflussfaktoren auf die Systemverlässlichkeit (nach ANDERS [2], überarbeitet)

Arbeitsplatz hinein. Die Entwickler sind dabei sowohl auf Betreiber- als auch auf Herstellerseite zu finden.

Wenn sich Sicherheitsbetrachtungen auf die Risiken beschränken, die von den Tätigkeiten des Bedieners ausgehen, besteht erstens die Gefahr, das Risiko von Fehlern im Gestaltungsprozess auszublenden. Zweitens vernachlässigen sie mögliche Unterschiede bei der Risikowahrnehmung zwischen Sicherheitsingenieur, Vorgesetztem und Bediener. Die Risikowahrnehmung besitzt beim Entwickler eine externe und relativ stabile Perspektive. Der Bediener schätzt *sein* Mensch-Maschine-System und das erwachsende Risiko dahingegen *laufend* und sehr flexibel ein. Überlegungen zur Risikowahrnehmung sind z.B. in [67] und [181] zu finden. Bezüglich der Fehler im Gestaltungsprozess wird natürlich versucht, das Risiko systematischer Fehler zu minimieren. Aus den Gefährdungsraten und Sicherheitsanforderungsstufen (Safety Integrity Levels) sind die zu ergreifenden Maßnahmen abzuleiten. Bei der Gestaltung werden jedoch auch die Regeln für die Bedienung niedergelegt. Der Entwickler sollte sich auch der Bedeutung seiner Tätigkeit beim Verfassen der Vorschriften und Bedienungshandbücher bewusst sein. Zwischen Entwickler und letztendlichem Bediener gibt es mit dem Vorgesetzten des Bedieners noch eine weitere Partei, die Risiken im Eisenbahnsystem laufend bewertet und steuert. Zum Beispiel ist er verantwortlich für die Dienstplanung und beeinflusst über die Frei- und Dienstzeiten die Müdigkeit des Bedieners.

		Beteiligter, ausführender Arbeitsplatz		
		Entwickler	Vorgesetzter	Bediener
Beteiligter, der das Risiko wahrnimmt	Entwickler	Begrenzt	Begrenzt	Sehr üblich
	Vorgesetzter	Nur indirekt	Begrenzt	Üblich
	Bediener	Nur indirekt	Nur indirekt	Begrenzt

Tabelle 3.1: Risikowahrnehmung verschiedener Beteiligter für verschiedene Arbeitsplätze

Die Tabelle gibt Aufschluss über die Risikowahrnehmung der einzelnen Beteiligten. Dabei ist beispielsweise wie folgt zu lesen: der Vorgesetzte des letztendlichen

Bedieners (vorletzte Zeile) nimmt das Risiko, das der Entwickler bereits in das System getragen hat, nicht oder nur mehr indirekt wahr. Über das von seiner eigenen Arbeit ausgehende Risiko ist er sich begrenzt bewusst. Seine Verantwortung für den letztendlichen Arbeitsplatz des Bedieners ist ihm üblicherweise bekannt.

In diesem Abschnitt wird deutlich, dass es keine substantielle, praxisnahe bzw. deutschsprachige Diskussion von menschlichen Fehlern im Eisenbahnsystem gibt. Dabei sind in der Forschung zur menschlichen Zuverlässigkeit *allgemein* über die Jahre bereits viele Ansätze entstanden und erörtert worden. Die Modelle sind unter Beachtung ihrer spezifischen Stärken und Schwächen grundsätzlich geeignet, um menschliche Handlungen zu modellieren. In dieser Arbeit wird später ein neuer Ansatz vorgestellt, um die menschliche Zuverlässigkeit im Eisenbahnsystem zu bewerten. Die Fokussierung auf Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter – also letztendliche Bediener im laufenden Betrieb – im Fortgang dieser Arbeit soll nicht außer Acht lassen, dass menschliches Handeln in vielen Lebenszyklusphasen und durch verschiedenen Parteien auf die Verlässlichkeit des Eisenbahnsystems wirkt. RAMS-Betrachtungen müssen *Human factors* in allen Phasen und Auftretensformen berücksichtigen.

Maßnahmen gegen menschliche Fehler sind in Deutschland bisher häufig auf der Basis von Erfahrungen im laufenden Betrieb getroffen worden. Wesentliche Überarbeitungen der PZB gehen z.B. auf Unfälle zurück. Erneut ist erkennbar, dass die Gestaltung des Eisenbahnsystems bisher vielfach den Weg der kontinuierlichen Automatisierung bzw. weiteren Absicherung menschlicher Bedienungen genommen hat. Die Modellierung und Analyse von menschlichem Einfluss – wie in dieser Arbeit angestrebt – kann also nicht nur der Beschreibung innerhalb des Gestaltungs- und Risikoanalyseprozesses, sondern auch der Ableitung von Gegenmaßnahmen bei bereits laufendem Betrieb dienen.

Zentral bei der Gestaltung des Bahnsystems, der Arbeitsplätze und bei der Fehlervermeidung bleibt die Frage der Auftretenswahrscheinlichkeit einzelner menschlicher Fehlhandlungen. Die quantitative Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit wird im Fortgang dieses Kapitels analysiert.

3.4 Daten zur Quantifizierung menschlicher Fehler

Dieser Abschnitt erläutert, aus welchen Quellen Daten zur Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler, speziell für den Eisenbahnverkehr, gewonnen werden können. Die wesentlichen Literaturquellen des kontinentalen Bahnverkehrs werden dabei erläutert. Die Methoden zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit werden zunächst ausgeklammert, da sie im folgenden Abschnitt angesprochen werden.

Einer der Gründe, warum Risikoanalysen die Wahrscheinlichkeiten menschlicher Fehler häufig nicht ausreichend betrachten, ist der Mangel an verlässlichen Daten. Solche Wahrscheinlichkeitswerte können aufgrund ihrer Seltenheit und anderen Widerständen nicht in der Praxis gemessen werden. Eine Messung in Eisenbahnsimulatoren bedeutet einen sehr hohen Aufwand zur Vorbereitung und aufgrund der nötigen Länge der Studien auch für die Durchführung. Zur Bestimmung einer Fehlerwahrscheinlichkeit von z.B. $p = 4 \cdot 10^{-3}$ müsste die jeweilige Tätigkeit mindestens $4 \cdot 10^3$ Male simuliert werden, wenn der Anspruch besteht, einen Schätzwert mit deskriptiver Statistik zu validieren. Es kann jedoch auch versucht werden, durch Studien in Eisenbahnlaboren qualitative oder semi-quantitative Aussagen zu den Wahrscheinlichkeiten zu erhalten und sie mit statistischen Verfahren hochzurechnen. Mit dem RailSiTe®/RailSET (Rail Simulation and Testing; Rail Simulation Environment for Train Drivers and Operators) des Instituts für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. und dem TCSim der Deutschen Bahn stehen solche Versuchsumgebungen zur Verfügung [66], [68], [107].

Trotz der geringen Verfügbarkeit verlässlicher Daten gibt es einige Versuche, die menschliche Zuverlässigkeit mit festen Fehlerwahrscheinlichkeiten in Risikoanalysen im Eisenbahnverkehr zu integrieren, z.B. Risikoanalysen für den Funkfahrbetrieb [19], den Zugleitbetrieb [185] und eine Sicherheitsbetrachtung zur Zugdateneingabe [186]. Mangels besserer Daten wird im Eisenbahnverkehr die Wahrscheinlichkeit von $p = 10^{-3}$ sogar häufig für alle menschlichen Fehler angenommen. In der Risikoanalyse zum System des elektronischen Buchfahrplans (EBuLa; Elektronischer Buchfahrplan und Verzeichnis der Langsamfahrstellen) wurde das Maß z.B. für die Übertragung der Buchfahrplandaten in die Datenbank des EBuLa-Rechners verwendet (s.a. [73]). Der Wert taucht auch in den Dokumenten zu ETCS als Annahme für die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler auf [176]. „Die 10^{-3} “ ist jedoch kein Ergebnis einer echten Studie bzw. Messung, es handelt sich in Wirklichkeit um eine Schätzung, die in den 1970er Jahren einmal in einer Beispielrechnung verwendet wurde. Die Herkunft wurde von HINZEN 1993 in einer detaillierten Lite-

raturanalyse aufgedeckt ([77], S.44 ff.). Bei der Annahme, HINZEN habe die Basis für die Anwendung der 10^{-3} im Eisenbahnverkehr geliefert, handelt es sich also um ein Missverständnis. Selbst wenn es sich dabei um ein Messergebnis handeln würde, gibt es keine Grundlage, dieselbe Wahrscheinlichkeit für alle menschlichen Fehler anzunehmen. Vielmehr ist bei menschlichen Handlungen sogar noch eine deutlich größere Streuung und Komplexität zu beobachten als bei den Ausfällen technischer Komponenten. Schließlich hängt die Wahrscheinlichkeit für menschliche Fehler von einem großen Spektrum von Einflussfaktoren ab, z.B. der Ausbildung für die Tätigkeit, der Arbeitsbelastung, der Gebrauchstauglichkeit der Instrumente und Bedienoberflächen, dem Regelwerk usw.

Eine Möglichkeit, um Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler zu erhalten, ist das Ableiten von Schätzwerten aus Unfallstatistiken. Zwar unterhalten das Eisenbahnbundesamt und die Deutsche Bahn AG Unfalldatenbanken, aus denen auch Daten zu menschlichen Faktoren extrahiert werden könnten, diese Daten sind aktuell schwer oder gar nicht zugänglich. Selbst wenn ein Zugang bestünde, wäre aus den Unfall- oder Ereignisdatenbanken häufig noch nicht direkt eine Fehlerwahrscheinlichkeit ableitbar. Nichtzuletzt liegt nicht notwendigerweise bei jedem Ereignis, bei dessen Ursachenanalyse auf menschliches Versagen geschlossen wurde, *ausschließlich* ein menschlicher Fehler vor.

Zugängliche, jährlich veröffentlichte Statistiken des britischen *Office of Rail Regulation* enthalten Daten zur Häufigkeit des Überfahrens Halt zeigender Signale (*Signals passed at danger*). Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den internationalen Eisenbahn- und Signaltechniksystemen und den Sicherheitsphilosophien lassen sich Daten anderer Länder nicht ohne Weiteres in Betrachtungen für den deutschen Eisenbahnverkehr integrieren. Eine Schätzung für Deutschland ist jedoch auf dem Eintrag für Signalfälle in der Datenbank der Europäischen Eisenbahngagentur ERA möglich.

$$\hat{p} = \frac{n_S}{n_A} = \frac{n_S}{p_{Halt} \cdot P_V \cdot r_{Sig}}$$

Dividiert man die Anzahl Signalfälle n_S durch die Gesamtheit aller Annäherungen auf Halt zeigende Signale n_A , erhält man eine Schätzung \hat{p} für die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler in dieser Situation. Für n_S ist in der Datenbank der ERA der Wert 760 angegeben. Die Wahrscheinlichkeit p_{Halt} , dass ein Signal bei Annäherung Halt zeigt, kann auf 0,01 geschätzt werden. Basis dafür ist ein Wert von 0,005 im Schweizer Personenverkehr [150]. Die Verkehrsleistung P_V beträgt in

Deutschland zirka 1050 Mio. Zugkilometer. r_{Sig} repräsentiert den durchschnittlichen Signalabstand. Auf der Grundlage von 170.000 Signalen auf 32.000 km Streckennetz ließe sich ein Quotient von 5 Signalen pro Kilometer errechnen. Da die Anzahl Signale um Vorsignale bereinigt werden müsste und in der Schweiz mit ca. 1 Signal pro Kilometer gerechnet wird (ebenso [150]), soll hier der Wert $r_{Sig} = 2 \frac{\text{Signale}}{\text{km}}$ angenommen werden. Der berechnete Schätzwert für Deutschland \hat{p} beträgt schließlich $4 \cdot 10^{-5}$. Es wäre also eine Fehlhandlung auf 25.000 Ausführungen zu erwarten.

Eine Studie des Betreibers des Pariser Metro- und S-Bahn-Verkehrs, der RATP, aus dem Jahre 1997 kommt zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Halt zeigendes Signal zu passieren, mit einer Sicherheit von 90 % zwischen $3 \cdot 10^{-5}$ und $5 \cdot 10^{-5}$ liegt [128]. An anderer Stelle werden von der RATP für den Nahverkehr ähnliche Werte für eine gewohnte Tätigkeit mit gutem Ausbildungsstand angegeben [179]:

- für eine einfache Aufgabe: $3 \cdot 10^{-5}$
- für eine komplexe Aufgabe, die in etwa 10 einfachen Aufgaben entspricht: $2 \cdot 10^{-4}$

Auch in den Niederlanden liegt die Wahrscheinlichkeit für das Überfahren Halt zeigender Signale mit $2,9 \cdot 10^{-5}$ (1 Fehlhandlung in 34.000 Ausführungen) in der gleichen Größenordnung wie oben [129]. Aufgrund der übereinstimmenden Datenlage gibt es für diesen speziellen Anwendungsfall also eine relativ belastbare Abschätzung.

Im slowenischen Eisenbahnverkehr wurden auf Basis einer Unfallanalyse sogar Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler im Bereich 10^{-7} geschätzt [86]. Ohne dass diese Angaben uneingeschränkte Gültigkeit für den regulären deutschen Bahnverkehr haben, bzw. wie bei den Signalfällen nur für einen Anwendungsfall gelten, so lassen sie doch erahnen, dass die menschliche Zuverlässigkeit am Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers deutlich besser sein kann, als es die Schätzung 10^{-3} widerspiegelt. Im Sinne der Sicherheit ist es richtig, dass eine so geringe Fehlerwahrscheinlichkeit mit dem häufig verwendeten, festen Wert nie unterschätzt wird. Könnten die geringen Wahrscheinlichkeiten jedoch zuverlässig methodisch nachgewiesen werden, würde auf technischer Seite eine Ersparnis zugunsten der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems möglich.

Eine wesentliche Forschungsarbeit für die menschlichen Fehlerraten im Eisenbahnkontext wurde 1993 durch HINZEN vorgelegt [77]. Fortgeschrittene Risiko-

analysen und Sicherheitsbetrachtungen beziehen sich auf die dort angegebenen Werte, z.B. [154]. Erstmals werden von HINZEN achtzehn verschiedene Werte für die menschlichen Fehlerraten im Eisenbahnkontext präsentiert. Die Zuverlässigkeit ist dabei abhängig vom Belastungsniveau und Umgebungsbedingungen, siehe Tabelle 3.2. Die Abhängigkeit vom dreistufigen Stresslevel und günstigen oder ungünstigen Umweltbedingungen soll der Tatsache Rechnung tragen, dass die Wahrscheinlichkeit für menschliche Fehler nicht konstant ist.

günstige Umweltbedingungen			
Menschliche Verhaltensebene	Unter- forderung	optimales Stressniveau	Über- forderung
fertigkeitsbasiert	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
regelbasiert	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
wissensbasiert	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$

ungünstige Umweltbedingungen			
Menschliche Verhaltensebene	Unter- forderung	optimales Stressniveau	Über- forderung
fertigkeitsbasiert	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
regelbasiert	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
wissensbasiert	1	$5 \cdot 10^{-1}$	1

Tabelle 3.2: Menschliche Fehlerraten in einem sicherheitlichen Mensch-Maschine-System im Eisenbahnverkehr [77]

Für die Erstellung der Wahrscheinlichkeitstabelle wurde durch HINZEN eine Literaturstudie durchgeführt. Die gefundenen menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeiten für verschiedene Tätigkeiten werden in die drei Verhaltensebenen von RASMUSSEN in fertigkeitsbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten kategorisiert. Die daraus gebildeten Durchschnittswerte werden von HINZEN im Anschluss mit aus der Literatur stammenden Messwerten zu Fehlerwahrscheinlichkeiten auf den drei Verhaltensebenen verglichen. HINZEN kommt zu dem Schluss, dass sich die angegebenen Fehlerraten des US-amerikanischen *Electric Power Research Institute* sehr gut mit den in der Literatur gefundenen Daten decken und somit als validiert

betrachtet werden können. Bei der Analyse der Literatur wird hauptsächlich auf Angaben menschlicher Fehlerwahrscheinlichkeiten bei Tätigkeiten im Kernkraftwerk, bei der Instandhaltung und in der Produktion zurückgegriffen. Durch diese Metaanalyse kann die grundsätzliche Validität der Angaben gezeigt werden. HINZEN schreibt selbst, dass der Transfer der Wahrscheinlichkeiten industrieübergreifend allerdings nicht ohne Weiteres möglich ist, da sich die Arbeitsbedingungen zwischen den Anwendungsfeldern stark unterscheiden. Indes kann in der referenzierten Arbeit die Anwendbarkeit des Modells durch eine zweite Validierung im Rahmen der Untersuchung von Unfallstatistiken im Eisenbahnverkehr gezeigt werden.

Ein pragmatischer Ansatz zur Quantifizierung menschlicher Fehler im Eisenbahnsystem aus dem Jahr 2009 sieht vor, eine Basiswahrscheinlichkeit mit vier Einflussfaktoren zu justieren [126]. In diesem Verfahren werden die vier Faktoren Ausbildungsstand, Komplexität der Aufgabe, Umgebungsbedingungen und Stress jeweils zweistufig als positiv oder negativ eingeschätzt. Insgesamt erhält man auf einfachem Wege eine grobe Schätzung der menschlichen Zuverlässigkeit, bei der jedoch der Erhalt der Basiswahrscheinlichkeit nicht ausreichend belegt ist. Die Herangehensweise bietet wie der Ansatz von HINZEN bei der Einbeziehung von arbeitsplatzbezogenen und leistungsbeeinflussenden Einflussfaktoren nur begrenzte Möglichkeiten.

Da weitere Werke zur menschlichen Zuverlässigkeit im deutschen Eisenbahnverkehr nicht bekannt sind, kann geschlossen werden, dass weitere Daten oder neuere und detaillierte Analysen zur Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler für die Arbeitsplätze im Eisenbahnsystem nicht verfügbar sind. Obwohl die Werte von HINZEN in Deutschland eine hohe Akzeptanz aufweisen, sind einige Punkte zu nennen, die Motivation für weitere Forschung sind: bei Hinzens Modell handelt es sich um achtzehn, generische und unveränderliche Werte, die sich an weitere Faktoren wie z.B. den Ausbildungsstand, die Art der Mensch-Maschine-Interaktion, die Gebrauchstauglichkeit zu bedienender Instrumente oder Oberflächen, die Komplexität des Regelwerks nicht anpassen lassen. Es wird nicht zwischen den Arbeitsplätzen von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern unterschieden. Die Arbeitssysteme haben sich in den vergangenen ca. 20 Jahren grundlegend verändert. Seit Erscheinen der Arbeit hat mit der Verbreitung der CENELEC-Normen der risikobasierte Ansatz die Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnsystem und deren methodischen Rahmen verändert. Insgesamt ergibt sich mangels weiterer Quellen also ein großer Forschungsbedarf nach Möglichkeiten zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr, die auf der Arbeit von HINZEN aufbauen können.

Weitere Einflussfaktoren in die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten mit einzubeziehen, ist Kerngedanke einiger Methoden zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit, die in anderen Industrien entwickelt wurden und die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

3.5 Methoden zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit

Für die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Bewertung der menschlichen Fehleranfälligkeit bei den Tätigkeiten von Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter ist es vorab notwendig, einen Blick auf die existierenden Methoden zu werfen. In diesem Abschnitt werden bestehende Verfahren des *Human Reliability Assessment* oder *Human Reliability Analysis (HRA)* auf ihre Tauglichkeit für den modernen Eisenbahnverkehr analysiert. Es wird gezeigt, dass sowohl die Methoden der ersten Generation als auch die Methoden der zweiten Generation und die eisenbahnspezifischen Anpassungen einiger Verfahren noch keine optimalen Lösungen bieten. Die Stärken und Schwächen werden im einzelnen herausgearbeitet.

3.5.1 Grundsätzliche Vorgehensweise der Methoden

Wahrscheinlichkeiten menschlicher Fehler waren und sind auch bei Sicherheitsbetrachtungen in anderen Domänen von Interesse. Für die Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit wurden deshalb zahlreiche HRA-Verfahren entwickelt, die sich grundsätzlich in drei aufeinander aufbauende Etappen einteilen lassen:

1. Identifikation der Möglichkeiten menschlicher Fehler: Human Error Identification (HEI)
2. Quantitative Bestimmung der Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler: Human Error Quantification (HEQ)
3. Ableitung von Gestaltungsempfehlungen zur Vermeidung menschlicher Fehler: Human Error Reduction (HER)

Ziel einer HRA ist eine Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit und Verbesserung der Voraussetzung für zuverlässiges Handeln des Menschen im technischen System und damit letztlich auch eine Steigerung der Verfügbarkeit (und Sicherheit) des technischen Systems. Wenn der gesamte Prozess durchschritten wird, wird im *Human Reliability Assessment* in der Regel wie folgt vorgegangen (nach [183]):

- Problemdefinition (Identifikation der Aufgaben des Bedieners)
- Aufgabenanalyse
- Identifikation möglicher Fehlhandlungen
- Identifikation möglicher, interner Fehlerursachen
- Analyse der Umgebungsbedingungen
- Identifikation möglicher Fehlerkorrekturen
- Quantifizierung der Fehlerwahrscheinlichkeit
- Analyse der Fehlerkonsequenzen
- Ableitung von Gegenmaßnahmen

Nicht alle HRA-Verfahren decken die gesamte Tätigkeitsspanne ab. Die HRA-Verfahren werden grundsätzlich in zwei Gruppen unterschieden: HEI-Techniken, die entweder eine Fehleridentifikation vornehmen oder zur menschlichen Zuverlässigkeit zumindest qualitative Aussagen treffen, zum einen sowie HEQ-Verfahren, die direkt auf die quantitative Bewertung einzelner Fehlerwahrscheinlichkeiten bei menschlichen Handlungen abzielen, zum anderen.

Die in technischen Bereichen verbreiteten, jedoch häufig unterschiedlich verwendeten Ausdrucksformen *qualitativ*, *semi-quantitativ* und *quantitativ* sollen in dieser Arbeit wie in Tabelle 3.3 dargestellt den Skalen der psychologischen Statistik [167] zugeordnet werden. Von oben nach unten nimmt in der Tabelle der Wert der Aussage zu. Qualitative Bewertungen mit Aussagen auf Ordinalskala ermöglichen Vergleiche und sind bereits hochwertiger als nominale Angaben. Semi-quantitative Aussagen implizieren die Angabe von Intervallen. In der Regel wird von HEQ-Verfahren eine quantitative Angabe auf Absolutskala angestrebt. Darüber hinaus streut die Häufigkeit menschlicher Fehler von Tag zu Tag und von Mitarbeiter zu Mitarbeiter, sodass im Idealfall eine statistische Verteilung angegeben werden sollte. Solche Aussagen würden in ihrer Qualität noch über Angaben zum Erwartungswert auf Absolutskala liegen, solche Erkenntnisse konnten HRA-Verfahren bisher jedoch nicht liefern.

3.5.2 Existierende Verfahren allgemeiner Art oder anderer Industrien

Für die Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit stehen durch langjährige Forschung zahlreiche, existierende Techniken zur Verfügung, von denen einige in Tabelle 3.4 zusammengestellt sind. Es handelt sich um die bekanntesten Methoden der so genannten ersten Generation von HRA-Verfahren, die überwiegend im Bereich der Luftfahrt oder der Kernenergie entwickelt wurden. Die jüngeren Verfah-

Skala	Beispiel	Bewertung	Ausdrucksform
nominal	$a \neq b$	qualitativ	Verbale Beschreibung
ordinal	$a > b$		Beschreibung durch Einteilung in Klassen
relativ	$a = 2 \cdot b$	semi-quantitativ	Einteilung in Klassen mit hinterlegten Intervallen
absolut	$a = 0,01$	quantitativ	Angabe von Werten

Tabelle 3.3: Zuordnung der Skalen zu den Niveaus der Ausdrucksformen

ren der zweiten Generation werden weiter hinten in diesem Kapitel erläutert und diskutiert.

Das große Interesse an methodischen Möglichkeiten zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit hat industrieübergreifend zu einem sehr weiten Feld an Publikationen geführt. Es wird überwiegend anerkannt, dass die Verfahren der ersten Generation zahlreiche Schwächen aufweisen. Die Kernpunkte werden hier anhand zweier Methoden exemplarisch geschildert, ohne dass vorhandene Reviews und Dokumente zu HRA-Methoden wiederholt werden sollen, siehe z.B. [54], [95], [163], [175], [183]. Wo möglich wird bei der folgenden Schilderung ein Bezug zum Eisenbahnverkehr hergestellt. Die Nachteile und Auswege suchende Ansätze werden im Anschluss noch einmal auf einer abstrahierten Ebene diskutiert.

Die meisten Methoden zur Fehleridentifikation beginnen mit einer Dekomposition der Gesamtaufgabe in Einzeltätigkeiten. Diese Arbeitsschritte werden im Anschluss in strukturierter Weise auf Fehlermöglichkeiten überprüft und mögliche, kognitive Fehlerursachen bestimmt.

SHERPA, *Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach*, 1986 für die Kernenergie entwickelt [43], teilt die Tätigkeiten nach der Aufgabenanalyse in Kategorien ein, über die die Fehlermöglichkeiten zugeordnet werden können. Die Analyse der Auftretenswahrscheinlichkeit, der Konsequenzen und der Behebungswahrscheinlichkeit erinnert an eine Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse (FMEA).

Human Error Identification	Human Error Quantification
ACIH [180]	HCR [71]
Human HAZOP [188]	HEART [191]
SHERPA [43]	SLIM [42]
TRACEr [161]	THERP [171]

Tabelle 3.4: Einige der bekanntesten HRA-Verfahren der ersten Generation

Human HAZOP basiert auf der Methode HAZOP (HAZard and OPerability Study). Dieses Verfahren wurde für die Chemieindustrie entwickelt und zieht zum strukturierten Brainstorming ein Expertenteam aus allen beteiligten Ebenen zusammen [163], [188]. Die Vorgehensweise ähnelt der SHERPA, für die Fehleridentifikation kommen hier jedoch so genannte *Guidewords* zur Anwendung.

Die Methode TRACEr (The Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors) wurde um die Jahrtausendwende für die Luftfahrt erarbeitet [161]. Nach der Fehleridentifikation auf der Mensch-Maschine-Ebene erfolgt eine Analyse der zugrunde liegenden *kognitiven* Mechanismen. Die Ergebnisse können für spätere Veränderungen am Arbeitssystem Startpunkte identifizieren. Für eine sorgfältige Durchführung einer prospektiven Betrachtung von TRACEr ist sehr gute Vertrautheit mit der Methode und/oder psychologische Expertise vonnöten. Eine solche Untersuchung wird für die Anwendung durch den Eisenbahningenieur in der Praxis zu umfangreich sein bzw. würde eine sehr aufwendige Einarbeitung bedeuten.

Analyse des Conséquences de l'Infiabilité Humaine (ACIH) bezeichnet eine Methode zur Identifikation und Analyse menschlicher Unzuverlässigkeit [180]. Grundlage ist eine recht einfache Dekomposition von Prozessen in Wahrnehmen, Entscheiden und Handeln. Die funktional geprägte Vorgehensweise unterscheidet sich im Grundprinzip kaum von anderen HEI-Methoden. Zu diesem Verfahren liegen jedoch keine unabhängigen Studien vor.

Die hier vorgestellten Methoden sind wie gesagt nur ein kleiner Teil des großen Spektrums an Verfahren. Beispielhafte Analysen für Szenarien des deutschen Eisenbahnverkehrs – die auch parallel zu dieser Arbeit durchgeführt wurden – haben gezeigt, dass die Methoden grundsätzlich helfen, Fehler in bestimmten Aufgabenbereichen zu identifizieren und auch zu bewerten. Teilweise passen die Kategorien

oder *Guidewords* jedoch nicht zu den Tätigkeiten eines Triebfahrzeugführers oder Fahrdienstleiters, sodass evtl. Fehler unentdeckt bleiben. Hier könnte eine mögliche Anpassung ansetzen, die Methoden für die Anwendung im Eisenbahnverkehrskontext zu ertüchtigen. Die methodische Nähe von etwa SHERPA zur FMEA ermöglicht prinzipiell eine Kombination von Verfahren zur Analyse technischer Ausfälle und menschlicher Fehler. Hier besteht grundsätzlich Potenzial für weitere Forschung zur gemeinsamen und ausgewogenen Betrachtung. Als Anknüpfungspunkte können zwei Studien einer so genannten *Human FMEA* dienen [1], [72]. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter verfolgt, da der Fokus auf den Fehlerauswirkungen liegt. Zur Wahrscheinlichkeitsbestimmung liefern die Varianten der FMEA kaum Handwerkszeug, es wird lediglich in Auslassungs- und Ausführungsfehlern unterschieden und die Art der Mensch-Maschine-Interaktion wird kaum betrachtet.

Die Methoden zur Quantifizierung menschlicher Fehler basieren ebenso überwiegend auf der Dekomposition der Hauptaufgabe in Einzeltätigkeiten zur Reduktion der Komplexität. Ferner werden leistungsbeeinflussende Faktoren (Performance Shaping Factors; PSF) verwendet, die die menschliche Zuverlässigkeit verändern. Die quantitativen Angaben gehen dabei entweder auf Expertenschätzungen zurück oder stammen aus Messungen in Laborstudien oder realitätsnahen Simulator-Experimenten.

Methoden wie SLIM [42], die sich im wesentlichen Expertenschätzungen und leistungsbeeinflussenden Faktoren bedienen, sind regelmäßiger Kritik ausgesetzt, die Schätzungen würden aufgrund ihres subjektiven Charakters nur eine eingeschränkte Validität besitzen [109].

Das Verfahren HCR (Human Cognitive Reliability) [71] verwendet RASMUSSENS Dreiteilung menschlicher Informationsverarbeitung in fertigungs-, regel- und wissensbasierte Handlungen als Kern. Sie dienen als Abstufung der menschlichen Zuverlässigkeit. Die Allgemeingültigkeit dieser sehr pragmatischen Vorgehensweise muss jedoch angezweifelt werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass fertigungs-basiertes Verhalten stets mit einer geringeren Fehlerwahrscheinlichkeit ausgeführt wird als wissensbasierte Tätigkeiten (z.B. siehe [54], zusammen mit weiteren Kritikpunkten [164]).

Einige Verfahren nutzen nach der Dekomposition der Hauptaufgabe in Einzeltätigkeiten einen Abgleich mit Modelltätigkeiten, für sie sind die Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler tabellarisch angegeben. An den bekanntesten und ältesten Methoden THERP (*Technique for Human Error Rate Prediction*) und HEART (*Hu-*

man Error Assessment and Reduction Technique) soll diese Vorgehensweise im Folgenden dargestellt werden. Da für eine *quantitative* Risikoanalyse eine qualitative Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit nicht ausreichend ist, wird dabei hier ein Fokus also auf zwei Methoden der quantitativen Bewertung gesetzt.

THERP beginnt mit einer Identifikation der menschlichen Handlungen im System. Diese werden mit einer Aufgabenanalyse in mehrere Einzelaufgaben zerlegt. Diese Teilaufgaben werden im Anschluss mit Aufgabenbeschreibungen aus dem THERP-Handbuch verglichen, und die am besten übereinstimmende Aktion wird ausgewählt. Die Grundwahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler, die dieser Aktion zugeordnet ist, wird anschließend durch den Bearbeiter weiter angepasst. Mit Hilfe der leistungsbeeinflussenden Faktoren wird die endgültige Wahrscheinlichkeit nach vorgeschriebenen Kombinationsregeln berechnet. Bei der Methode HEART verläuft der Prozess ganz analog. Die leistungsbeeinflussenden Faktoren werden hier *error producing conditions* genannt. Der Unterschied zwischen den beiden Techniken besteht in der Detailtiefe. Während THERP sehr detailliert vorgeht, begnügt sich HEART einer größeren Modellierung.

Auch wenn es mit HEART und THERP möglich ist, Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler zu bestimmen, müssen einige grundsätzliche Nachteile der Methoden zur menschlichen Zuverlässigkeit beachtet werden. Die Datenquellen für eine Ermittlung von Fehlerwahrscheinlichkeiten bilden im wesentlichen Literaturdaten für vergleichbare Handlungen (generische Daten wie z.B. Tabellen im THERP-Handbuch) oder Beobachtungen von Fehlhandlungen in dem zu analysierenden System bzw. in einem vergleichbaren Mensch-Maschine-System (systemspezifische Daten). Zu ersteren sei angemerkt, dass die Fehlerwahrscheinlichkeiten entweder von Experten geschätzt wurden – und somit eben der Kritik der sehr subjektiven Einschätzung ausgesetzt sind – oder auf Laboruntersuchungen basieren, in denen die menschliche Leistungsfähigkeit unter strikt kontrollierten Umgebungsbedingungen untersucht wurde. In solchen Laboruntersuchungen können die menschlichen Handlungen – und somit die Möglichkeiten, Fehler zu machen – auf ein Minimum beschränkt werden. Die generelle Validität solch monotoner Studien mit repetitiven Aufgaben sollte kritisch beleuchtet werden. Für valide Aussagen zum Eisenbahnverkehr sind realitätsnahe Simulationen mit anwendungsspezifischem und ingenieurpsychologischem Versuchsdesign günstiger geeignet.

Ein weiteres, großes Problem vieler und auch dieser Methoden ist zudem die geringe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Verschiedene Bearbeiter können bei Verwendung derselben Technik deutlich abweichende Resultate für die gleiche Tätigkeit

erhalten. Ebenso kann es vorkommen, dass sie zwar die gleichen Fehlerwahrscheinlichkeiten erhalten, dabei aber unterschiedliche leistungsbeeinflussende Faktoren berücksichtigt haben. Die leistungsbeeinflussenden Faktoren dienen als Ausgangspunkt für Gegenmaßnahmen, um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu reduzieren (Human Error Reduction). Wenn verschiedene Mitarbeiter zu gleichen Ergebnissen, aber unterschiedlichen leistungsbeeinflussenden Faktoren kommen, werden die getroffenen Gegenmaßnahmen weniger wirksam sein. Darüber hinaus ist der Prozess, wie die Faktoren in die Berechnung einbezogen werden, in den Methoden nicht gut strukturiert aufbereitet. In vielen Fällen handelt es sich um eine große Zahl von Einflussfaktoren, die darüber hinaus auch noch voneinander abhängig sind. Die Menge an leistungsbeeinflussenden Faktoren und fehlende Erläuterungen erhöhen das Risiko, ähnlich lautende Faktoren fälschlicherweise doppelt zu werten und das Ergebnis zu verfälschen. Viele Mitarbeiter verwenden die leistungsbeeinflussenden Faktoren in der Praxis nur selten [95]. Schließlich kann die Anwendung verschiedener Methoden für dieselbe Tätigkeit zu stark abweichenden Fehlerwahrscheinlichkeiten führen [96]. In der zitierten Studie wurden für den Fehler „Triebfahrzeugführer nimmt das Signal nicht wahr“ mit verschiedenen Methoden zwei um Zehnerpotenzen voneinander abweichende Fehlerwahrscheinlichkeiten, nämlich 0,286 und 0,00159, berechnet. Am Rande sei angemerkt, dass auf die Angabe der Wahrscheinlichkeit mit drei führenden Stellen verzichtet werden sollte, wenn die Genauigkeit des erhaltenen Werts im Grunde auf einer Schätzung basiert. Die Angabe täuscht dann eine Präzision vor, die der Wert nicht besitzt.

In der Literatur können unterschiedliche Auffassungen zur Anwendbarkeit der HEQ-Methoden im Eisenbahnsystem gefunden werden. Eine Studie aus Großbritannien hält die Methode HEART für die Tätigkeiten von Fahrdienstleitern für bestens praktikabel [76]. Anderenorts wird die Auffassung vertreten, dass die allgemeinen Aufgabenbeschreibungen aus HEART sich nicht gut in Übereinstimmung mit den Arbeitsbedingungen der Menschen im Eisenbahnsystem bringen ließen [173]. Eine genauer Blick auf die generischen Aufgabenbeschreibungen aus HEART deckt das Kernproblem auf: einer der Aufgabentypen lautet beispielsweise: „Routinemäßige, oft geübte, rasche Aufgabe, die ein relativ niedriges Maß an Fähigkeit erfordert“ [191]. Es ist schwierig, die Tätigkeiten im Eisenbahnsystem den vorgegebenen Aufgabenbeschreibungen und ihren Nebenbedingungen eindeutig zuzuordnen [96]. Die beschriebenen Aufgabentypen überschneiden sich und decken doch nicht den ganzen Bereich möglicher Aufgaben ab. Ähnliche Probleme treten bei der Anwendung von THERP auf [95].

Zusammenfassend ist zu sagen, dass existierende HRA-Verfahren der ersten Generation im Ansatz einige Schwächen aufweisen, von denen einige punktuell hervorgehoben werden konnten. Bezüglich der Anwendbarkeit im Eisenbahnverkehr zeigen erste Studien kein eindeutig positives Bild.

3.5.3 Existierende Verfahren für Eisenbahn-Arbeitsplätze

Im Rahmen des Forschungsprojekts HUSARE wurde ein *Human Factors Analysis Toolkit* entwickelt, das in der Lage ist, *Human factors issues* beim grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehr in Europa zu analysieren und Maßnahmen zur Fehlervermeidung abzuleiten [88]. Das Toolkit enthält im Kern einen Baustein zur Fehleridentifikation, der typischen HEI-Verfahren gleicht. Im Anschluss an eine Szenarioauswahl und -beschreibung erfolgt eine Datensammlung und Analyse von leistungsbeeinflussenden Faktoren für alle involvierten, nationalen Eisenbahnnetze. Über einen Vergleichsschritt sollen Unterschiede und *human factors issues* identifiziert werden. Die Tabelle im letzten Schritt ähnelt einer FMEA. Ihre Spalten lauten Aufgabe, Abweichungen/*human factors issues*, Fehlermöglichkeit, Behebungsmöglichkeit, mögliche Konsequenzen, Maßnahmen zur Vermeidung des Fehlers und zur Verringerung der Auswirkungen.

Ein zusätzliches Modul ermöglicht auf eine sehr knappe Art und Weise auch die semi-quantitative Einschätzung des so genannten *human factors risk*. Für die Bestimmung des Risikos wird die Auftretenshäufigkeit benötigt, in die die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler auf einer dreistufigen Skala einbezogen wird (siehe Tabelle 3.5).

Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler	Aufgabenkomplexität	
	gering	hoch
wenig Zeit zu reagieren	mittel	hoch
ausreichend Zeit zu reagieren	gering	mittel

Tabelle 3.5: Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler nach dem HUSARE-Toolkit [88]

Das *Human Factors Analysis Toolkit* enthält zwar eine handliche Methode zur Anwendung im Eisenbahnverkehr, wurde jedoch für die Identifikation von Problemen im grenzüberschreitenden Verkehr entwickelt. Die Methode betont Fehleridenti-

fizierung und -vermeidung, steht aber nicht im Kern für eine Quantifizierung zur Verfügung. Eine Anwendung außerhalb des Projekts ist leider nicht bekannt. Die Vorgehensweise berücksichtigt die arbeitspsychologischen Phänomene wie z.B. Stress oder Müdigkeit unglücklicherweise nur am Rande, die leistungsbeeinflussenden Faktoren sind etwa sehr technisch orientiert. Es wird darüber hinaus nicht geprüft, wie Mensch und Maschine in Interaktion die Sicherheitsfunktionen erfüllen – erneut werden nur Auslassungs- und Ausführungsfehler betrachtet.

Die Schwierigkeiten mit bestehenden HRA-Verfahren, die im vorherigen Abschnitt erläutert wurden, waren der Auslöser für das britische *Rail Safety and Standards Board* (RSSB), die Entwicklung einer Methode speziell für den Eisenbahnverkehr, bzw. zunächst für den Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers, zu beauftragen [175]. Zwei unabhängige Unternehmen erstellten schließlich die aneinander anknüpfenden Methoden *rail-HEI* und *rail-HEQ* [56], [131]. Bei der eisenbahnspezifischen HEI-Methode handelt es sich um eine Anpassung der existierenden Methode TRACER, daher wird das neue Verfahren gelegentlich auch als *TRACER-Rail* zitiert. Die Methode bietet Varianten zur retrospektiven und zur prospektiven Analyse an, des Weiteren eine *Full*- und eine *Lite*-Version, wählbar je nach Expertenwissen des Anwenders und gewünschter Detailtiefe bei Betrachtung der Fehlermodi. Der Quantifizierungsteil, also *rail-HEQ*, basiert auf HEART und sollte die Anwendung im Eisenbahnkontext grundsätzlich vereinfachen. Für die Anpassung wurden die Aufgabenbeschreibungen von HEART durch neue Aufgaben- und Fehlertypen ausgetauscht, die Basiswahrscheinlichkeiten und die leistungsbeeinflussenden Faktoren wurden durch für den Eisenbahnverkehr gültige Werte und Multiplikatoren ersetzt.

Das Verfahren *rail-HEQ* wird in einer vergleichenden Studie für Lokführerarbeitsplätze als beste Methode und als Verbesserung gegenüber HEART bewertet [96]. Jedoch werden die Komplexität und die schwierige Auswahl von Performance Shaping Factors als Nachteile bzw. Punkte für künftige Verbesserungen genannt. Ein unabhängiges Review aus Großbritannien offenbart ebenso einige Schwächen: zwischen der Fehleridentifizierung (*rail-HEI*) und der Quantifizierung (*rail-HEQ*) fehlt eine Durchgängigkeit, die richtige Einbeziehung von Aufgaben- und Fehlertypen ist für den Bearbeiter sehr komplex und durch die Anpassung der zugrunde liegenden Methode HEART auf den Eisenbahnverkehr werden manche leistungsbeeinflussenden Faktoren fälschlicherweise doppelt gewertet [75]. Eine durchgeführte Analyse der Methode mit Daten und Nutzertests kann die Validität der Ergebnisse nicht nachweisen, sondern berichtet, dass die berechneten Zuverlässigkeiten zumindest erste, viel versprechende Ergebnisse böten [53]. Eine Behebung der im Review festgestellten Schwächen ist offenbar Gegenstand aktueller Forschung des RSSB

auf dem Weg zur Veröffentlichung einer neuen Version der Methode. Im Zuge dieser Überarbeitung wird auch erwogen, letztlich zu den Grundzügen von HEART zurückzukehren.

Ein Blick hinter die Kulissen der sehr komplexen Methode rail-HEQ stellt außerdem die Gültigkeit der Ausgangswerte infrage. Für die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten wurden Triebfahrzeugführer ganz verschiedener Fahrzeuge des Nah-, Regional- und Fernverkehrs als Experten herangezogen, um in Workshops ihre eigenen absoluten Fehlerwahrscheinlichkeiten zu schätzen. Menschen haben jedoch grundsätzlich Schwierigkeiten, ihre eigenen Fehlerwahrscheinlichkeiten zu schätzen. Möglicherweise gaben die Fahrer auch absichtlich höhere Zuverlässigkeitswerte an, um sich selbst nicht in ein negatives Licht zu rücken.

Schließlich stellt sich die Frage, ob die methodischen Ergebnisse auf den deutschen Eisenbahnverkehr anwendbar sind, da die britischen Grundvoraussetzungen z. B. bei Führerständen, Zugsicherungssystemen und Signalsystem ganz andere sind. Es ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass es sich bei der zugrunde liegenden Methode HEART um ein Verfahren handelt, das außerhalb von Großbritannien bislang keine hohe Akzeptanz aufweist.

Am Imperial College London wird aktuell an einer Methode zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr geforscht – offenbar unabhängig von den Arbeiten des RSSB – es sind jedoch bisher noch keine Erkenntnisse veröffentlicht worden, einziger Hinweis siehe [89].

Neben den bereits erläuterten, prospektiv vorgehenden Techniken existieren noch weitere Verfahren für die Analyse menschlicher Faktoren gezielt im Eisenbahnverkehr. Sie gehen jedoch retrospektiv vor, basieren also auf Ereignis- und Unfalldaten. Diejenigen Techniken, die speziell für den Eisenbahnverkehr entwickelt wurden oder eine Variante für dieses Anwendungsfeld besitzen, sollen hier der Vollständigkeit halber genannt und recht knapp erläutert werden:

- Die HRA-Methode TRACER wurde zur Unfallanalyse im *australischen* Eisenbahnverkehr angepasst. Es handelt sich also um ein Verfahren ähnlich zu der britischen Entwicklung rail-HEI (TRACER-Rail). Die australische Version heißt TRACER-RAV (Rail Australian Version) und basiert auf vorhergehenden Studien zur Klassifikation von Human factors in Ereignisanalysen [9], [10].
- Das Human-factors-Klassifikationsschema der retrospektiven Methode HFACS *Human factors Analysis Classification Scheme* wurde für Eisenbahnunfälle in

den USA angepasst, es ist unter dem Stichwort HFACS-Railroad/HFACS-RR zu finden [141].

- In Großbritannien wurde weit vor rail-HEI und rail-HEQ außerdem ein eisenbahnspezifisches Unfallanalyseverfahren *RAIT (Railway Accident Investigation Tool)* entwickelt [136].
- Für die koreanischen Eisenbahnen wurde jüngst eine Methode namens CAS-HEAR (Computer-Aided System for Human Error Analysis & Reduction) zur Ereignisanalyse aufgebaut [97]. Diese komplexe Methode, die über 130 leistungsbeeinflussende Faktoren berücksichtigt, versucht, die kognitiv sehr beanspruchende Tätigkeit der Analyse menschlicher Fehler innerhalb eines Unfalles oder Ereignisses durch die Computerunterstützung abzumildern.

Alle Verfahren besitzen eine recht hohe Komplexität. Mangels verfügbarer Ereignisdaten für den deutschen Eisenbahnverkehr können die Techniken für den Fokus dieser Arbeit, die vorausschauende Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit, keinen entscheidenden Beitrag liefern.

3.5.4 Zweite Generation von existierenden Verfahren

Aufbauend auf den ersten HRA-Methoden wie THERP und HEART wurden seit Mitte der 1990er-Jahre neue Techniken entwickelt, die einer zweiten Generation von HRA-Verfahren zugerechnet werden. Diese Gruppe von Techniken wendet sich von der schlichten Betrachtung seriell ablaufender, prozeduraler Einzelschritte ab und bezieht die Handlungsziele des Menschen in die Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit ein. Die zweite Generation prägt also ein Ansatz mit kognitivem Fokus bzw. dem Versuch der besseren Beschreibung wissensbasierter Handlungen. Außerdem werden vielerorts die zuvor nicht betrachteten *errors of commission* berücksichtigt.

Einige der neuen Methoden basieren dabei auf Ereignisdaten, die im Eisenbahnverkehr derzeit schwer zugänglich sind, z.B. das Verfahren CAHR (Connectionism Assessment of Human Reliability) [164]. Viele andere widmen sich eher der präzisen Identifikation menschlicher Fehler sowie Beschreibung kognitiver Abläufe beim Bediener statt gezielt einer neuen, quantitativen Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit. Die Methode CREAM (Cognitive Reliability Error Analysis Method) etwa modelliert menschliches Verhalten über kognitive Verarbeitungsstufen und verschiedenen Kontrollmodi, zur Quantifizierung kommen jedoch Werte aus Expertenschätzungen zur Anwendung [81]. Teil von ATHEANA (A Technique for

Human Error Analysis) ist erneut RASMUSSENS Modell der drei Verhaltensebenen, zur Quantifizierung werden HEART, Expertenschätzungen oder Simulatorexperimente vorgeschlagen [115]. CODA (Conclusions from Occurrence by Description of Actions) bezieht zwar die *Errors of commission* in die Betrachtung ein, neue Entwicklungen zur quantitativen Bewertung werden jedoch nicht präsentiert [139].

Auch mit den Methoden der zweiten Generation von HRA-Verfahren konnte die prospektive Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit noch nicht vollständig gelöst werden, insbesondere für quantitative Angaben besteht nach wie vor Forschungsbedarf. Durch die Einbeziehung der Handlungsziele und weiterer Fehlertypen sowie Fokussierung auf kognitive Prozesse besteht außerdem das Problem der hohen Komplexität fort. Bei der zweiten Generation sind überdies noch keinerlei Studien im Eisenbahnverkehrskontext durchgeführt worden, sodass über die Validität noch keine Aussagen zu treffen sind.

3.5.5 Diskussion der Bewertungsverfahren

In diesem Abschnitt sollen die Probleme bei der Verwendung existierender HRA-Verfahren noch einmal zusammengestellt und diskutiert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.6 zusammengestellt und werden im Folgenden auch textlich erläutert. In der Tabelle sind untereinander die wichtigsten Kriterien zur Tauglichkeit von HRA-Verfahren aufgelistet. Die dreistufige Skala mit –, ◦ und + gibt an, in welchem Maße die Ansätze die an sie gestellten Kriterien erfüllen. Ein besonderes Augenmerk muss dabei auf die sorgfältige Unterscheidung zwischen ursachen- und auftretenensorientierter Betrachtung gelegt werden, denn die Vernachlässigung der *errors of commission* verfälscht die methodischen Ergebnisse. Der zweite Fokus liegt auf der Komplexität bzw. der Erlernbarkeit der Verfahren. Der hohe Aufwand zur Berechnung einer Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler war bisher ein großes Hindernis zur Nutzung von HRA-Verfahren in der Eisenbahnpraxis.

Die HRA-Verfahren der ersten Generation werden dem aktuellen Bedarf nach Integration der menschlichen Zuverlässigkeit nicht vollständig gerecht. Die Methoden weisen folgende Schwächen auf:

- *Methodenimmanente Schwächen:* Die HRA-Verfahren der ersten Generation sind als solche wegen ihrer Schwächen regelmäßiger Kritik ausgesetzt. Die Grundlagen der Quantifizierung sind bei manchen Methoden kritisch zu hinterfragen, manche Verfahren liefern bei verschiedenen Anwendern stark

	HRA- Verf. der 1. Gene- ration	rail- HEI & rail- HEQ	HRA- Verf. der 2. Gene- ration
Fehleridentifizierung			
• Analytik zur Fehleridentifizierung	○	+	+
• Qualität des Informationsverarbeitungsmodells	–	○	+
• Unterscheidung von ursachen- und auftretens-orientierter Fehlerbetrachtung, Integration von <i>errors of commission</i>	–	–	○ / +
• Generische und grafische Kopplung des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine mit der Herstellung der Sicherheitsfunktion	–	–	○
Fehlerquantifizierung			
• Methodik zur Quantifizierung	ja	ja	teils
• Qualität der quantitativen Angaben	– / ○	○	○ / +
Weitere Kriterien			
• Entwicklung für moderne Arbeitsplätze	–	○	+
• Entwicklung speziell für Eisenbahnsysteme	–	+	–
• Leichte Erlernbarkeit und Durchführbarkeit	– / ○	– / ○	– / ○

Tabelle 3.6: Übersicht über die Eigenschaften der HRA-Verfahren

abweichende Ergebnisse. Viele Verfahren bieten eine Quantifizierung an, ohne dass die vorhergehende qualitative Analyse einwandfrei ist. Es ist bei diesen Ansätzen außerdem zu beachten, dass die Ziele des Menschen bei der Handlung kaum einbezogen werden. Häufig werden nicht alle Fehlerarten (z.B. absichtliche Fehler) berücksichtigt. *Errors of commission* fehlen bei der ersten Generation der HRA-Verfahren und auch bei klassischen Modellierungen zur Klassifikation menschlicher Fehler. Nicht zuletzt sind viele Methoden sehr komplex anzuwenden, manche beschreiben den Umgang mit den leistungsbeeinflussenden Faktoren nicht in leicht verständlicher Weise.

- *Tauglichkeit für Eisenbahnarbeitsplätze fraglich:* Viele HRA-Verfahren der ersten Generation wurden im Bereich der Luftfahrt oder der Kernenergie entwickelt. Die Gültigkeit der Methoden für den Eisenbahnverkehr ist sehr fraglich bzw. müsste erst noch gezeigt werden, zumal sich im Laufe der Jahre seit Entwicklung der Verfahren die Mensch-Maschine-Systeme in allen Industrien deutlich verändert haben. Die Beschreibungen der Einzelaufgaben aus den Methodenhandbüchern lassen sich nicht ohne weiteres mit heutigen Tätigkeiten im Eisenbahnverkehr in Übereinstimmung bringen. Große Mengen an Einflussfaktoren erschweren die Handhabbarkeit der Methoden und bergen mit Abhängigkeiten untereinander das Risiko für verfälschte Ergebnisse. Die hohe Komplexität der Methoden ist ein Hindernis bei der zügigen Anwendung im Prozess von Sicherheitsbetrachtungen.
- *Dilemma zwischen Risikoanalysen und Human factors:* Aus Human factors Sicht ist eine ganzheitliche Herangehensweise an menschliche Tätigkeiten und Fehlermöglichkeiten anzustreben. Dieser Bedingung wird bei der ersten Generation von HRA-Verfahren mit der Analyse von Auslassungs- und Ausführungsfehlern Rechnung getragen. Auch die FMEA als Methode der Sicherheitstechnik kann Auslassungen oder fehlerhafte Ausprägung analysieren. Die Fehlerbaumanalyse verwendet jedoch eine binäre Unterscheidung zwischen richtiger und falscher Handlung und begünstigt somit eine eingeschränkte Sicht auf menschliche Verhaltensmöglichkeiten. Die Analysen des Probabilistic Safety Assessment favorisieren eine szenarienbasierte Herangehensweise [165], da sie sich auf die Frage konzentrieren, *Handelt der menschliche Bediener in dieser bestimmten Situation richtig?* Mit anderen Worten, genau dafür wird eine Wahrscheinlichkeit gesucht. Die Risikoanalyse basiert häufig auch auf einer technischen Perspektive: die menschlichen Einflussfaktoren werden vor allem dann einbezogen, wenn in den untersten Verzweigungen des Fehlerbaums eine menschliche Bedienung auftaucht. Es entsteht also ein Dilemma zwischen der spezifischen Betrachtung der Risi-

koanalysen und dem möglichst breiten Ansatz aus ingenieurpsychologischer Perspektive, das nicht ohne Weiteres lösbar ist.

Die Methoden rail-HEI und rail-HEQ zeichnen sich dadurch aus, dass sie explizit für die modernen Arbeitssysteme der Triebfahrzeugführer in Großbritannien entwickelt wurden. Da die Methoden auf bestehenden Verfahren der ersten Generation basieren, werden *errors of commission* nicht in die Bewertung integriert. Ebenso besteht das Problem der Komplexität im Umgang mit den leistungsbeeinflussenden Faktoren fort, wenngleich die Methoden eine weniger umfangreiche *lite*-Version anbieten.

Einige HRA-Verfahren der zweiten Generation erfüllen die Kriterien bereits in akzeptablem Maße (siehe Tabelle 3.6). Als nachteilig sind nach wie vor die Komplexität und die bislang nicht bekannte Anwendung auf Arbeitsplätze des Eisenbahnverkehrs zu nennen. Eine abschließende Diskussion zu den Ansätzen zur Integration menschlicher Faktoren und zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit folgt im Anschluss an das folgende Unterkapitel. Dort wird auch der Weg vorgezeichnet, den diese Arbeit im Folgenden einschlägt.

3.6 Resilience engineering

Aufgrund der Schwierigkeiten, menschliche Fehler in Sicherheitsbetrachtungen einzubeziehen, hat sich in der Forschung der Sicherheitswissenschaft in den letzten Jahren eine neue Entwicklung gezeigt. Zunächst wurde festgestellt, dass menschliche Fehler nicht die Ursache von Unfällen sind, sondern die Folgen von systemimmanenten Schwächen im Hintergrund. Seit einigen Jahren findet darüber hinaus eine Abkehr von Modellen statt, die den einzelnen Menschen und sein Verhalten in potentiell gefährlichen Situationen zu erklären versuchen. Denn es gehe gar nicht um die Minimierung von Fehlerhäufigkeiten, sondern um das Vermeiden unerwünschter Ereignisse. Das Konzept des *Resilience Engineering* fordert eine ganzheitliche Betrachtung aller menschlichen Handlungsmöglichkeiten. Es versteht die menschliche Variabilität als positive Eigenschaft statt den menschlichen Fehler als Risiko. In diesem Forschungsgedanken wird Sicherheit als die Anwesenheit einer Anpassungsfähigkeit des Systems statt der Abwesenheit von Schwächen oder menschlichen Fehlern interpretiert [83]. Dieses Konzept kehrt sich aufgrund der Zahl der Einflussfaktoren und der Komplexität menschlichen Verhaltens vollständig von einer quantitativen Einschätzung einer Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler ab.

Die Idee menschlicher Anpassungsfähigkeit und Reaktionsfähigkeit wurde bereits auf das Fahren von Stadtbahnen angewendet, zu einer für Risikoanalysen direkt nutzbaren Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit gelangt die Arbeit jedoch nicht [128]. Die mit dem neuen Forschungsgedanken des Resilience Engineerings verwandte Unfallanalysemethode *FRAM*, entwickelt von HOLLNAGEL [82], wurde ebenso bereits in der Eisenbahndomäne genutzt. BELMONTE wendet den Ansatz auf die Arbeitsplätze in Betriebszentralen der Eisenbahn an [11], [12]. Es ist allerdings zu beachten, dass alle diese Forschungsarbeiten aufgrund ihres Abstands zur klassischen Betrachtung menschlicher Fehler zwar Human factors und Sicherheit zusammenbringen, jedoch den Bedarf im Bereich des quantitativen Sicherheitsnachweises, den die CENELEC-Normen aufspannen, nicht vollständig beantworten. Weitere Ansätze, in denen Resilience Engineering mit Eisenbahnverkehr zusammengebracht wird, jedoch ohne Fokus auf die menschliche Zuverlässigkeit, sind unter [51] sowie [60] zu finden.

Aufgrund der Neuheit des Resilience Engineerings liegen noch keine detaillierten Methoden zur Risikobewertung vor und die Anwendung im Eisenbahnsystem besitzt eine eher langfristige Perspektive. Die Andersartigkeit macht eine weitere Betrachtung dieses Ansatzes in dieser Arbeit schwierig. Dennoch ist der Grundgedanke, eine ganzheitliche Betrachtung des Mensch-Maschine-Systems der quantitativen Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit für eine ganz bestimmte Teiltätigkeit vorzuziehen, sehr vielversprechend für eine weitere Betrachtung.

3.7 Resümee

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass ein nennenswerter Bedarf für die Integration menschlicher Einflussfaktoren in Sicherheitsbetrachtungen vorliegt. Wenngleich die einschlägigen Normen die Einbeziehung fordern, fällt die Integration in klassische Techniken der Risikoanalyse mangels aussagekräftiger Daten zur menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr nicht leicht. Zu beachten ist, dass die Einbeziehung menschlicher Einflussfaktoren in den Entwurf von Eisenbahnsystemen weitaus komplexer ist, als Fehlerwahrscheinlichkeiten in klassische Methoden der Risikoanalyse zu integrieren.

Die Erkenntnis, dass eine vollständige Automatisierung nicht möglich ist, hat sich in der Ingenieurpsychologie und dem Human factors engineering bereits durchgesetzt. Es ist auch im Eisenbahnsystem empfehlenswert, künftig statt der Entmündigung der

menschlichen Bediener eine Strategie der ausgewogenen Systemgestaltung zwischen Mensch und Maschine zu verfolgen. Die Automatisierung und die Absicherung menschlicher Tätigkeiten durch technische Systeme können sehr kostenintensiv sein. Das Ergänzen des Regelwerks überträgt zwar die Verantwortung auf den letztendlichen Bediener, bezüglich der Sicherheit besteht jedoch ein Risiko, dass der menschliche Bediener diese Regeln nicht stets korrekt befolgen kann. Tabelle 3.7 stellt die Vor- und Nachteile der Ansätze noch einmal zusammen. Insgesamt überwiegen aus Sicht der *Human factors* die Schwächen, sodass es im Sinne der Sicherheit dauerhaft keine Lösung sein sollte, menschlichen Handlungen in der Systemgestaltung mit den dargelegten, klassischen Ansätzen zu begegnen.

Der zweite Teil der Tabelle (Tabelle 3.8) gibt eine Übersicht über die in den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels vorgestellten Herangehensweisen zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit. Bei den ersten beiden Ansätzen, also den festen Fehlerwahrscheinlichkeiten 10^{-3} oder den Werten nach HINZEN, überwiegen die Nachteile. Starre Angaben lassen sich nicht an die heterogenen Situationen in Arbeitssystemen anpassen.

Würde im Rahmen einer Risikoanalyse die Wahrscheinlichkeit einer Fehlhandlung in einem bestimmten Kontext im Eisenbahnverkehr benötigt, könnten bislang letztlich zunächst nur die Methoden zur Identifizierung und Quantifizierung menschlicher Fehler zum Einsatz kommen. Für semi-quantitative Angaben im Eisenbahnverkehrskontext müssten die Techniken mit großer Sorgfalt auf die Arbeitsbedingungen des Triebfahrzeugführers oder Fahrdienstleiters angepasst werden. Allein für diese Adaption wäre eine umfangreiche, vorherige qualitative Analyse der Aufgaben und Randbedingungen sowie der Fehlermöglichkeiten nötig. Letztendlich ließen sich vermutlich auch bei sorgfältiger Vorgehensweise nicht alle methodenimmanenten Schwächen eliminieren. Die Schwierigkeiten bei der Modellierung menschlicher Informationsverarbeitung und der Vorhersage menschlichen Verhaltens haben zu einer hohen Komplexität bei den existierenden HRA-Verfahren geführt. Der Bearbeitungsumfang für eine menschliche Zuverlässigkeit übersteigt dabei erstens die dem Sicherheitsingenieur zur Verfügung stehenden Ressourcen. Zweitens ist die Präzision der quantitativen Werte kritisch zu hinterfragen, zumal die Methoden selbst überwiegend keine Anpassung auf den (deutschen) Eisenbahnverkehr mitbringen.

Der Ansatz des Resilience Engineering, Sicherheit als Belastbarkeit bzw. Robustheit zu verstehen ist grundverschieden zu den aktuell im Eisenbahnverkehr vorgeschriebenen Prozeduren im Sicherheitsnachweis. Für den Fortgang dieser Arbeit kann

Umgang mit menschlichen Handlungen bei der Systemgestaltung		
Systemansatz	Vorteile	Nachteile
Substitution der menschlichen Tätigkeiten durch technische Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung des menschlichen Einflusses 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfekte Automatisierung nicht möglich • Risiko der Unterforderung im Regelfall und Überforderung im Einsatzfall
Absichern menschlicher Bedienhandlungen durch technische Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Menschliche Fehler im Regelbetrieb ohne Folgen 	<ul style="list-style-type: none"> • Menschliche Handlungen im Störungsbetrieb bleiben bestehen
Hinzufügen von Regeln; Erwartungen der fehlerlosen Ausführung	<ul style="list-style-type: none"> • Übertragung der Fehlerverantwortung auf den Bediener 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexe und evtl. widersprüchliche Regelwerke • fehlerlose Ausführung nicht möglich

Tabelle 3.7: Ansätze und Methoden zur Berücksichtigung menschlicher Einflussfaktoren und ihre Vor- und Nachteile (Teil 1)

lediglich der Gedanke der ganzheitlichen Betrachtung menschlicher Handlungen berücksichtigt werden.

Der vorgeschriebenen Integration von menschlichen Einflussfaktoren in Verlässlichkeitsbetrachtungen kann also nach aktuellem Stand der Forschung nicht adäquat begegnet werden. Es wäre also grundsätzlich wünschenswert, einzelne Komponenten bestehender und neuer Systeme künftig mit neuem Handwerkszeug zu untersuchen. Mit den Erkenntnissen dieses Kapitels muss von einem hohen Bedarf nach einer handhabbaren Methode zur zumindest vergleichenden Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr gesprochen werden.

Eine quantitative Angabe für die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler wäre aus Sicht der Risikoanalysen sehr wünschenswert, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht zu erzielen sein. Die Komplexität – oder pointiert formuliert das Dilemma – entsteht durch die unterschiedlichen Ansprüche der verschiedenen Disziplinen: Die Fehlerbaumanalyse aus der Sicherheitstechnik begünstigt nicht nur, sondern verlangt mit einer Wahrscheinlichkeit oder Ausfallrate eine binäre Unterscheidung richtiger oder falscher Ausführung. Dem steht das ingenieurpsychologische Wissen um verschiedene Ausführungsformen und Fehlertypen menschlichen Handelns gegenüber.

Da feste Fehlerwahrscheinlichkeiten die Variabilität menschlichen Verhaltens nicht ausreichend abbilden, kann die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit nur mit methodischen Verfahren gelingen. Die existierenden Methoden sind sehr komplex, berücksichtigen nicht alle Fehlerarten und mancherorts basieren quantitative Angaben auf unzureichenden Grundlagen. Es ist also das Ziel dieser Arbeit, ein Fundament für die künftig sorgfältigere Einbeziehung menschlicher Einflussfaktoren in Verlässlichkeitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr zu schaffen. Im Zusammenhang wird hinsichtlich der Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit für Risikoanalysen eine für die Praxis vorgesehene, handhabbare, qualitative Methodik entwickelt, die den ingenieurpsychologischen Erkenntnissen anderer Industrien in diesem Themengebiet Rechnung trägt. Für diese Entwicklung muss zunächst ein sorgfältiges und umfassendes Modell menschlicher Verhaltensweisen bzw. Fehler geschaffen werden, das sämtliche Fehlermodi abdeckt. Außerdem müssen Modelle für die Mensch-Maschine-Interaktion in Arbeitssystemen als Handwerkszeug herangezogen werden. Später wird die Art und Weise, wie Sicherheitsfunktionen von Mensch-Maschine-Systemen erbracht werden, zu analysieren sein.

Herangehensweisen zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit		
Systemansatz	Vorteile	Nachteile
Feste Fehlerwahrscheinlichkeiten, z.B. 10^{-3}	<ul style="list-style-type: none"> • sehr leichte Anwendbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Missachtung der hohen Streuung menschlicher Leistungsfähigkeit • Zuverlässigkeit abhängig von Umgebungsfaktoren • wissenschaftliche Grundlage des Werts fraglich
Modell von 18 festen Fehlerwahrscheinlichkeiten nach HINZEN	<ul style="list-style-type: none"> • leichte Anwendbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Werte nicht an weitere Situationen anpassbar • Datengrundlage aus anderen Industrien, Übertragbarkeit fraglich
Klassische Methoden der Human Reliability Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • strukturierte Verfahren zur Quantifizierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Komplexität • Berücksichtigung nicht aller Fehlerarten • Datengrundlage aus anderen Industrien, Übertragbarkeit fraglich
Eisenbahnspezifische Methoden der Human Reliability Analysis (HRA)	<ul style="list-style-type: none"> • strukturierte Verfahren zur Quantifizierung • Berücksichtigung von Eisenbahnspezifika 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Komplexität • Berücksichtigung nicht aller Fehlerarten • Datengrundlage fraglich, Validität für deutsches Eisenbahnsystem zu prüfen
Resilience Engineering	<ul style="list-style-type: none"> • Versuch der Umkehr des Sicherheitsbegriffs 	<ul style="list-style-type: none"> • noch keine Methoden für den quantitativen Sicherheitsnachweis verfügbar

Tabelle 3.8: Ansätze und Methoden zur Berücksichtigung menschlicher Einflussfaktoren und ihre Vor- und Nachteile (Teil 2)

4 Modellierung des menschlichen Verhaltens und der Mensch-Maschine-Interaktion im Arbeitssystem

Aufbauend auf den grundlegenden Erkenntnissen der vorherigen beiden Abschnitte werden in diesem Kapitel Modelle für die Interaktion von Menschen mit technischen Systemen vorgestellt, um menschliche Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem systematisch adressieren zu können. Eine Reihe von Begrifflichkeiten im Bereich *Human factors* wird damit strukturiert. Zur Integration von menschlichen Faktoren in RAMS-Betrachtungen wird ein Ursache-Wirkungs-Diagramm vorgestellt. Darüber hinaus dienen die folgenden Betrachtungen als Fundament zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit mit Hilfe der so genannten Mensch-Barrieren-Interaktion ab dem nachfolgenden Kapitel, denn nur mit einer sorgfältigen, qualitativen Grundlage sind diesbezügliche Untersuchungen tragfähig.

In diesem Kapitel wird einleitend ein tabellarisches Modell vorgestellt, mit dem eine ganzheitliche Perspektive auf das menschliche Verhaltensspektrum möglich wird. Die Schwächen bisheriger, im vorherigen Kapitel vorgestellter Ansätze werden durch die Trennung von der Betrachtung auf Verhaltens- und Mensch-Maschine-Ebene umgangen. Das Modell bietet eine entscheidende Grundlage zur qualitativen Modellierung menschlicher Fehler. Im Anschluss werden die Grundzüge der Interaktion von Menschen mit technischen Systemen erläutert. Wo sich Menschen und Maschinen wie bei Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter in Arbeitsumfeldern befinden, handelt es sich bei der Modellierung des Zusammenspiels Mensch-Maschine gleichzeitig um eine Abbildung des Arbeitssystems. In Abschnitt 4.3 werden die existierenden Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung diskutiert und eines für die weitere Arbeit vorgestellt.

Beginnend mit Abschnitt 4.4 wird eine Modellierung für die Mensch-Maschine-Interaktion in den Arbeitssystemen von Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter entwickelt. Dabei wird zum einen eine Perspektive für das gesamte Bahnsystem präsentiert, zum anderen eine Modellierung für einzelne Arbeitssysteme vorgeschlagen. Bei der Entwicklung steht im Vordergrund, dass es sich um eine Abbildung handelt, die für den Praktiker handhabbar ist und dabei vollständig konsistent mit den Er-

kenntnissen der Arbeits- und Kognitionspsychologie ist. Das Modell hilft bei der Strukturierung und Entzerrung von *performance shaping factors*. In Abschnitt 4.5 werden die leistungsbeeinflussenden Faktoren von Abhängigkeiten untereinander befreit und für die Anwendung im Eisenbahnverkehr zusammengestellt. Die Modellierungen der Arbeitssysteme und der leistungsbeeinflussenden Faktoren können als Grundlage für Verlässlichkeitsbetrachtungen dienen. Die nach DIN EN 50126-1 geforderten Ursache-Wirkungs-Diagramme werden in Abschnitt 4.6 entwickelt.

4.1 Tabellarisches Modell zur Klassifikation menschlichen Verhaltens

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass zur Modellierung menschlicher Fehler zahlreiche Ansätze zur Verfügung stehen. Viele Modelle und Methoden trennen dabei nicht ausreichend zwischen den Ursachen (genotypes) und Auftretensarten (phenotypes) menschlicher Fehler. Zahlreiche HRA-Verfahren sind nicht in der Lage, *errors of commission* zu berücksichtigen. Zur sorgfältigen Klassifikation und weiteren Analyse menschlicher Handlungen in technischen Systemen soll an dieser Stelle eine neue Modellierung entwickelt werden. Sie beseitigt nicht nur bestehende Missverständnisse im Bereich der Forschungen zur menschlichen Zuverlässigkeit, sondern ist auch zentral für die Frage, ob menschliche Fehler sicherheitsrelevante Folgen besitzen.

In einem Schema zur ganzheitlichen Modellierung menschlicher Fehler müssen die Dimensionen der ursachen- und auftrittsorientierten Herangehensweisen nicht nur sorgfältig unterschieden, sondern auch beide integriert werden. Sowohl Handlungen, Auslassungen und auch allen Typen von Ausführungsfehlern können prinzipiell alle Phänomene der ursachenorientierten Betrachtung zugrundeliegen. Werden die beiden unabhängigen Dimensionen auf zwei verschiedenen Achsen aufgetragen, erhält man das Grundgerüst von Abbildung 4.1. Es handelt sich um ein *tabellarisches Modell* zur Klassifikation menschlicher Verhaltensmöglichkeiten.

Auf der linken Seite der Abbildung ist die ursachenorientierte Betrachtung zu finden (verschiedene Gründe auf der vertikalen Achse des Diagramms). Unterschieden wird zwischen guter und schlechter Absicht (Absichtsauswahl), zwischen aus Sicht des menschlichen Bedieners geeignetem und ungeeignetem, kognitiven Ziel (Zielauswahl) und schließlich nach Ausführungsqualität. Die drei Kriterien, die acht Möglichkeiten aufspannen würden, sind teilweise zusammengefasst. Diese Klassifikation deckt nicht alle möglichen Zusammenhänge menschlicher Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung ab, soll aber für eine grundlegende Modellierung zunächst ausreichen. Weitere Forschungsarbeiten könnten das Modell an dieser Stelle um die kognitiven Abläufe erweitern oder präzisieren. In der oberen Hälfte der rechten Seite der Abbildung werden die Ausprägungen menschlichen Handelns angeordnet. Auf der horizontalen Achse des Diagramms befinden sich also Auslassungs- und Ausführungsfehler. Die Ausprägungen werden oberhalb so gleich mit einer Bewertung auf der Mensch-Maschine-Ebene (richtig oder fehlerhaft) verknüpft.

Eine auf der Situationsebene richtige Handlung ist in der Regel nur dann zu erwarten, wenn der menschliche Bediener mit guter Absicht handelt und aus einem geeigneten Ziel eine Handlung auswählt und übereinstimmend mit dem Ziel ausführt (Feld links oben). Die anderen drei Möglichkeiten, z.B. dass ein ungeeignetes Ziel richtig umgesetzt wird und dieses abweichende Verhalten auf der Mensch-Maschine-Ebene unerwartet richtig ist, sind gewissermaßen *zufallsrichtig*, sind sehr unwahrscheinlich und komplex zu fassen (Feld links unten). Sie können aus Sicht der Risikobetrachtung vernachlässigt werden. Eine Ausnahme könnten sehr einfache Arbeitssysteme mit lediglich binären Entscheidungsmöglichkeiten sein, wie sie im Eisenbahnverkehr kaum vorkommen. *Errors of commission* (rechts oben) treten auf, wenn der menschliche Bediener in guter Absicht ein Handlungsziel verfolgt und umsetzt, das aus Systemsicht (also auf der Mensch-Maschine-Ebene) nicht erforderlich ist. Hierbei können auch *errors of commission* auftreten, die gleichzeitig Ausführungsfehler sind: ein Beispiel wäre ein Bediener, der an einem Instrument den (für ihn auf Verhaltensebene *richtigen*) Wert x einstellt – *richtig* auf Mensch-Maschine-Ebene wäre aber der Wert $x + \delta$. Es handelt sich in diesem Beispiel also um einen Ausführungsfehler falscher Intensität. Sämtliche bisher nicht beschriebenen Fälle sind fehlerhafte Handlungen (rechts unten): es handelt sich um Zusammenhänge, bei denen sowohl eine Abweichung auf der Verhaltensebene, als auch eine Abweichung auf der Mensch-Maschine-Ebene auftritt.

Bei der Bewertung auf der Mensch-Maschine-Ebene sind zwei Fälle zu unterscheiden. Im Normalfall wird eine Bedienung mit einer bestimmten Intensität die richtige

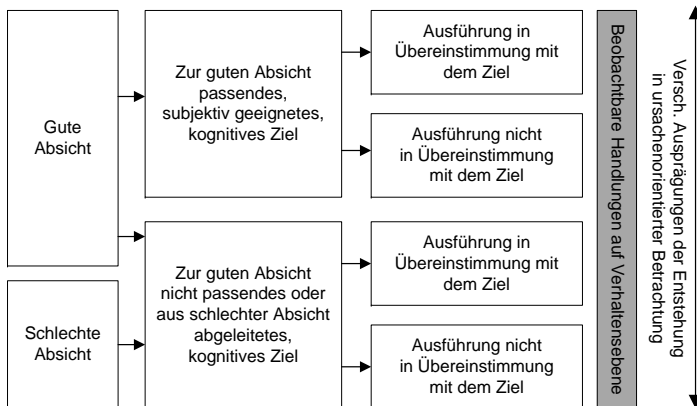


Abbildung 4.1: Tabellarisches Modell für die Klassifikation und Analyse menschlicher Fehler (Teil 1; Anschluss auf der gegenüberliegenden Seite)

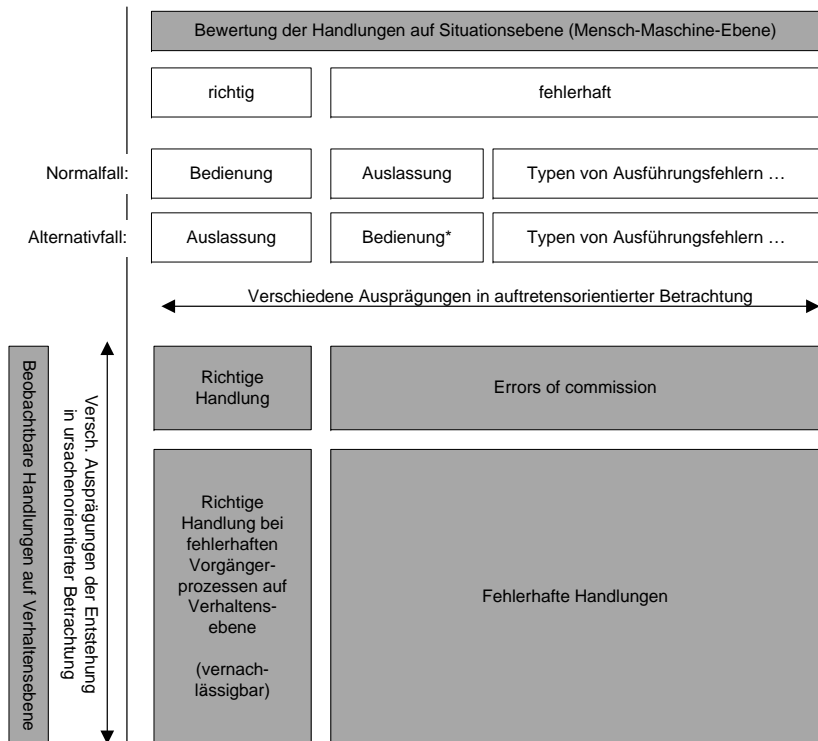


Abbildung 4.2: Tabellarisches Modell für die Klassifikation und Analyse menschlicher Fehler (Teil 2)

Handlung sein. Eine Auslassung oder fehlerhafte Ausführung sind entsprechend Arbeitsfehler. Ein Beispiel für diesen Fall ist das Betätigen des Horns durch den Triebfahrzeugführer nach dem Passieren einer so genannten Pfeiftafel bei Annäherung an einen nichttechnisch gesicherten Bahnübergang. Es kann jedoch umgekehrt in einer bestimmten Situation auch eine Auslassung bzw. die Unterlassung einer Handlung richtig sein. Jegliche Bedienung ist in diesem alternativen Fall auf der Mensch-Maschine-Ebene fehlerhaft. Die Zusammenhänge des alternativen Falls soll ein zweites Beispiel verdeutlichen: Nach einem *Halt erwarten* zeigenden Vorsignal wird die Bremsung zum Hauptsignal von der Zugbeeinflussung überwacht. Die Möglichkeit der Befreiung aus dieser Überwachung ist für die Annäherung auf ein mittlerweile Fahrt zeigendes Hauptsignal vorgesehen. Befreit sich der Triebfahrzeugführer aus der Bremskurve, ohne dass das Signal Fahrt zeigt, liegt ein auf der Situationsebene fehlerhaftes Verhalten vor (Stern in Abbildung 4.2). Es kann jedoch zunächst nicht bestimmt werden, welche Ausprägung menschlicher Verhaltensmöglichkeit auf Verhaltensebene zugrunde liegt.

Das beschriebene tabellarische Modell liefert ein ganzheitliches Betrachtungsschema für menschliche Fehler, das die ursachenorientierte und auftretensorientierten Dimensionen in einem Diagramm vereinigt und dennoch keine Vermischung der Herangehensweisen vornimmt. Bisherige Ansätze untersuchten nur einen Teil menschlicher Verhaltensmöglichkeiten. Im Sinne dieses Modells erklärt, wurden nur die beiden Felder *richtige Handlungen* und *fehlerhafte Handlungen* (links oben und rechts unten im grau hinterlegten Kern des Diagramms) berücksichtigt. Dabei werden die *errors of commission* unterschlagen. Das tabellarische Modell verdeutlicht, dass ein methodischer Fehler vorliegt, wenn ein Ansatz Ausführungsfehler direkt mit den unteren drei Phänomenen der Verhaltensebene in Verbindung bringt. Es kann sich beim Ausführungsfehler auch um einen *error of commission* handeln und eine (auf Verhaltensebene) korrekte Ausführung zugrundeliegen. Durch dieses Modell werden einige Missverständnisse bestehender Klassifikationen ausgeräumt, und so kann es auch über die Eisenbahndomäne hinaus zur Verdeutlichung menschlicher Handlungsmöglichkeiten verwendet werden. Es dient ebenso als Grundlage für die Bewertung menschlicher Handlungsweisen im Kontext von Sicherheitsbarrieren später in dieser Arbeit.

4.2 Mensch-Maschine-Systeme

Um die Interaktionen von Menschen mit technischen Systemen zu beschreiben, wird im Folgenden ein Modell der Mensch-Maschine-Systeme vorgestellt. Dazu wird zunächst ein Blick auf die Definition geworfen.

„Unter einem Mensch-Maschine-System wird die zweckmäßige Abstraktion des zielgerichteten Zusammenwirkens von Personen mit technischen Systemen zur Erfüllung eines fremd- oder selbstgestellten Auftrages verstanden. Die allgemeine Struktur eines Mensch-Maschine-Systems ist die eines rückgekoppelten Systems, in dem ein Mensch oder ein Team entsprechend seiner organisatorischen Verankerung, seiner Zielstellung, des Auftrags und der wahrgenommenen Rückmeldungen über Umgebung und Prozesszustand Entscheidungen fällt und das technische System steuert.“

Ein Mensch-Maschine-System wird wie im vorstehenden Zitat beschrieben definiert [55]. Über seine Sensorik und die Motorik interagiert der Mensch mit den Ein- und Ausgabe-Systemen des technischen Systems. Die Ein- und Ausgabesysteme stellen auch die *Benutzeroberfläche* des technischen Systems, also die *Mensch-Maschine-Schnittstelle*, dar. Soll ein Modell eines bestimmten Arbeitssystems geschaffen werden, so können Elemente des technischen Systems, mit denen der Mensch nicht interagiert, entfallen. Sie liegen dann außerhalb der Systemgrenze des Mensch-Maschine-Systems.

Die Betrachtung einzelner Punkte innerhalb des Mensch-Maschine-Systems reicht aus Systemperspektive nicht aus. Die Interaktion muss eingebettet in die Umgebung analysiert werden ([55], S. 605). Eine entsprechende Modellierung findet sich in den VDI-Richtlinien zur menschlichen Zuverlässigkeit und im Ansatz der so genannten *Systemergonomie* [20], [184], siehe Abbildung 4.3. Dieser Ansatz bietet eine fundamentale Grundlage für die Modellierung von Mensch-Maschine-Systemen und menschlichen Tätigkeiten im Arbeitskontext. Er eignet sich zur Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion mit Blick auf eine ingenieurmäßige Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit vor allem deshalb, da die Herangehensweise zum großen Teil regelungstechnische und mathematische Modelle zur Beschreibung der ergonomischen Fragestellungen verwendet. Der Operateur wird als Regler verstanden und das technische System als Regelstrecke [20].

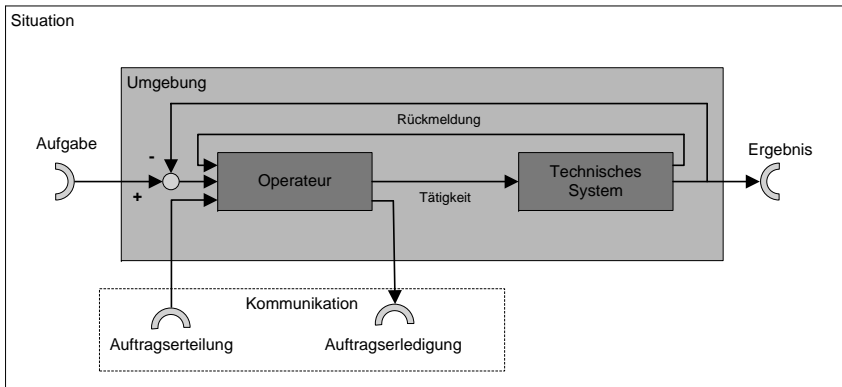


Abbildung 4.3: Mensch-Maschine-System, eingebettet in Umgebung und Situation, Notation aus [184]

Als *technisches System* oder synonym *Maschine* wird im Folgenden die Gesamtheit aller technischen Systeme verstanden, mit denen der Mensch interagiert. Im Bereich des Feldes *Umgebung* befinden sich die Einflüsse auf die Mensch-Maschine-Interaktion, die keinen direkten Zusammenhang mit der Aufgabe und den Aufträgen besitzen. Sie sind auch im Sinne der leistungsbeeinflussenden Faktoren in Zusammenhang mit existierenden HRA-Verfahren zu verstehen. Unter *Situation* werden im Sinne der menschlichen Zuverlässigkeit schließlich die zeitabhängig vorliegenden Informationen bzw. Bedingungen verstanden, die nicht unmittelbar auf das Arbeitssystem wirken, z.B. zusätzliche Störungen oder erweiterte, organisatorische Einflussfaktoren.

Es muss allerdings an dieser Stelle hervorgehoben werden, dass das Modell auch einzelne Schwächen besitzt. Die Analogie zur Regelungstechnik weist keine vollständige Deckungsgleichheit auf. Beispielsweise würde die im Modell als Feld dargestellte *Umgebung* (oder Umwelt) im Regelkreis als Störgröße modelliert werden. Außerdem würde die zweite Rückmeldung, die mit positivem Vorzeichen auf den menschlichen Bediener wirkt, das System destabilisieren. Auch die Auftragserteilung und -erledigung sind in der Regelungstechnik in der Form nicht wiederzufinden. Schließlich wird auch von den Entwicklern eingeräumt, dass eine solche mathematische Modellierung der menschlichen Tätigkeiten nur bei hochgeübten Aufgaben sinnvoll ist [20].

Während in der Regelungstechnik die quantitative Analyse eines technischen Systems im Vordergrund steht, sind für die Perspektive der Mensch-Maschine-Systemtechnik qualitative Aussagen zunächst ausreichend. Mit anderen Worten, in der Regelungstechnik wird mit der bildlichen Darstellung des Regelkreises eine mathematische Analyse unterstützt und in der Mensch-Maschine-Systemtechnik werden Wirkungszusammenhänge beschrieben. Ein weiterer, systematischer Unterschied ergibt sich aus den Herangehensweisen der Disziplinen: Die Regelungstechnik zielt auf den Entwurf eines Reglers zur Gewährleistung der Stabilität des Gesamtsystems ab. Gerade der Regler, also der Operateur, wird jedoch aus ingenieurpsychologischer Sicht als unveränderlich angesehen: Das technische System soll an den Menschen angepasst werden.

Die Modellierung eines Wirkungskreislaufs in einer Schleife ist den Fragestellungen der beiden Disziplinen grundsätzlich gemein. Soll die Modellierung Operateur als Regler und Maschine als Regelstrecke beibehalten werden, würde Abbildung 4.4 eine Grundlage für eine regelungstechnisch einwandfreie Notation bieten. Sämtliche Umweltfaktoren bilden hier eine Störgröße externer Einflüsse, die auf die Stellgröße wirkt. Beispiele für die Fahraufgabe des Lokführers können die Streckensteigung oder Wetterbedingungen sein. Sie beeinflussen letztendlich den Ist-Wert. Für die Regelungstechnik ungewöhnlich mag die Einführung einer zweiten Störgröße vor dem Regler erscheinen. Sie modelliert die menschlichen Fähigkeiten und Grenzen in Form von persönlichen Einflussfaktoren wie z.B. Motivation und Ausbildungsstand. Müdigkeit beispielsweise könnte den Informationsfluss des Reglers beeinträchtigen. In dieser Modellierung wurde versucht, Probleme bei der Messung des Ist-Werts durch ein Messrauschen abzubilden. Ist etwa eine Anzeige ergonomisch sehr schlecht gestaltet, kann es beispielsweise dazu führen, dass zwar der Ist-Wert korrekt ist, jedoch ein falscher Wert gemessen, also abgelesen wird. Dieser Punkt zeigt jedoch, dass das Modell für die Anwendung auf einen jeweiligen Arbeitskontext angepasst werden muss. Eine Analyse der Systemstabilität ist mit dem Modell in regelungstechnischer Notation nicht ohne Weiteres möglich, da quantitative Daten oder mathematische Funktionen für die Systemkomponenten des Mensch-Maschine-Systems in aller Regel nicht vorliegen.

Das zuerst vorgestellte Modell aus Abbildung 4.3 wird in dieser Arbeit weiter verwendet, da es in der Mensch-Maschine-Systemtechnik sehr verbreitet ist. Im Fokus stehen dabei auch nicht sämtliche Pfeile aus der Abbildung, sondern die Einbettung des bilateralen Mensch-Maschine-Systems in einen gewissen Kontext. Von den Grundsätzen der Regelungstechnik wird damit im Einzelnen abgewichen, denn eine

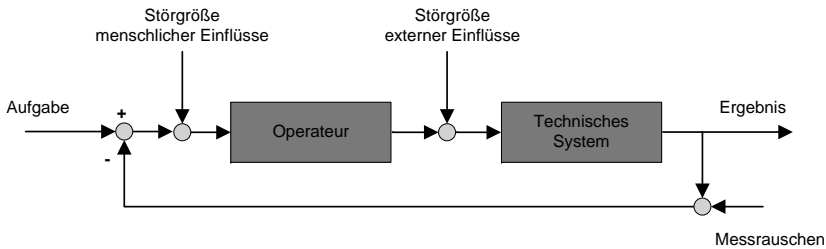


Abbildung 4.4: Regelungstechnische Notation für das Mensch-Maschine-System

vollkommene, mathematische Abbildung ist nicht beabsichtigt. Die Modellierung des grundlegenden Aufbaus des Mensch-Maschine-Systems steht im Vordergrund.

Im Rahmen der so genannten *Systemergonomie* – verknüpft mit dem Konzept der *kognitiven Kopplungen* – wurden sieben Kriterien entwickelt, mit denen die Einbindung des Menschen in den Arbeitskontext und die Komplexität der Aufgabe beschrieben werden können [6], [20]. Die wichtigsten zwei seien hier kurz beschrieben: Bei der Einbindung des Menschen wird erstens zwischen aktiven Systemen (serieller Verschaltung) und monitiven Systemen (paralleler Verschaltung) unterschieden [182]. Während der Mensch bei einer seriellen Verschaltung eine aktive Rolle bei der Bedienung des technischen Systems innehat (Abbildung 4.3), überwacht er bei monitiven Systemen die Ausführung der Leistungs- oder Sicherheitsfunktion durch das technische System und einen zusätzlichen Regler. Der Mensch greift also nur punktuell ein. Die aktiven Systeme können zweitens in geschlossene Verarbeitungen (Regelungen) (Abbildung 4.3) und offene Verarbeitungen (Steuerungen) unterschieden werden. Im Gegensatz zu einer Regelung ist bei einer offenen Verarbeitung der Rückführstrang des Regelkreises nicht (oder noch nicht) geschlossen. Nach dem Verständnis der *Systemergonomie* liegt eine Regelung vor, wenn vom menschlichen Bediener am technischen System eine Größe wie z.B. Geschwindigkeit, Druck oder Position (meistens über eine längere Zeitspanne hinweg) einzustellen ist. Die Rückmeldung muss innerhalb von 2 bis 3 Sekunden erfolgen, anderenfalls handelt es sich laut [20] um eine Steuerung.

Die Systemergonomie ist einer der wenigen Ansätze, der die Aufgaben auf Basis des abgebildeten Mensch-Maschine-Modells in generischer Art und Weise beschreibt und der gleichzeitig Aussagen über die Komplexität der Interaktion erlaubt. Eine Kopplung zur Frage, welche Interaktion zur Erfüllung einer Sicherheitsfunktion

notwendig ist, ist bislang noch nicht bekannt. Dieser Schritt würde eine direkte Relation zur menschlichen Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Schwierigkeit des Mensch-Maschine-Systems ermöglichen.

Als Ziele für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen gelten mindestens hohe Verlässlichkeit/Sicherheit, hohe Funktionalität, gute Beherrschbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Persönlichkeitsentfaltung und angemessene Gebrauchstauglichkeit [172]. Aus dieser Reihe stehen in dieser Arbeit in erster Linie die Sicherheit und Funktionalität im Fokus. Sie sind jedoch nur über eine nutzergerechte Gestaltung erreichbar. Aus Sicht der Arbeitswissenschaft – also gegenüber der Mensch-Maschine-Systemtechnik aus einer etwas abstrahierten Perspektive gesehen – steht bei der Gestaltung des Arbeitssystems das menschliche Wohlbefinden im Vordergrund. Als Zwischenziele können dabei die Bewertungsebenen *Ausführbarkeit*, *Erträglichkeit*, *Zumutbarkeit* und *Zufriedenheit* bei der Tätigkeit gelten (s.a. [101]). Ziele der Eisenbahnsystemtechnik und der Sicherheitstechnik sind die optimale Leistung und Effizienz des Mensch-Maschine-Systems sowie die Fehlerminimierung, um letztlich einen sicheren und effizienten Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten.

4.3 Menschliche Informationsverarbeitung

Da sich Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter im Wesentlichen mit komplexen, mentalen Aufgaben befassen, reicht eine Modellierung für die Interaktion mit den technischen Systemen nicht aus. Bei solchen Tätigkeiten spielt die Kognition eine so große Rolle, dass für Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit auch ein Modell der menschlichen Informationsverarbeitung herangezogen werden muss.

Im Komplex der menschlichen Informationsverarbeitung existiert genauso wie im Thema *Human error* bereits seit mehreren Jahren kontinuierliche Forschung. Es können nur die wichtigsten Modelle angesprochen werden. Eine sehr klassische und einfache Modellierung menschlicher Informationsverarbeitung ist die Aufteilung in Wahrnehmen → Entscheiden → Handeln. Dieses Modell wird auch von einigen HRA-Verfahren der ersten Generation, wie z.B. THERP, verwendet. Die Aufteilung ist für die Analyse und Bewertung einfacher menschlicher Tätigkeiten, die diesem sequentiellen Prozess folgen, hinreichend gut geeignet. Bei Aufgaben mit hohem kognitiven Anteil, also Überwachen und Steuern, weist es Schwächen auf, da für die menschliche Entscheidungsfindung ein komplexerer Ablauf zugrunde liegt. So

kann z.B. für eine Entscheidung zu einer Handlung ein nochmaliger Rückgriff auf die Wahrnehmung nötig werden. Aus diesem Grund bietet auch eine Aufteilung der menschlichen Informationsverarbeitung in mehr als drei Schritte, wie 1984 von WICKENS vorgeschlagen, keine weiteren Vorteile [189]. Eine sequentielle Darstellung wird der Komplexität der kognitiven Prozesse nicht gerecht [170].

Einen wesentlichen Impuls erhielt die Modellierung menschlichen Verhaltens und menschlicher Entscheidungsprozesse durch RASMUSSENS Drei-Ebenen-Modell [134]. Es dient bis heute in vielen Quellen als Referenz. Wie bereits in vorherigen Kapiteln skizziert, unterscheidet es zwischen fertigkeits-, regel- und wissensbasiertem Verhalten. Die durchlaufenen Prozesse sind in Abbildung 3.1 auf Seite 33 dargestellt.

Das Drei-Ebenen-Modell bildet für das Verständnis der Informationsverarbeitung zweifelsfrei einen fundamentalen Schritt gegenüber sequentiellen Modellierungen. Manche Art und Weise, mit der das Modell in der Sicherheitstechnik und in Bezug auf menschliche Fehler interpretiert und verwendet wird, ist jedoch problematisch. Häufig wird das Niveau der kognitiven Verarbeitung mit dem Charakter der Aufgabe gleichgesetzt, als würden manche Aufgabentypen stets durch eine bestimmte Ebene kognitiven Verhaltens bearbeitet. Zusätzlich ist fertigkeitsbasiertes Verhalten nicht immer weniger fehleranfällig als wissensbasierte Handlungen. Vor den Unstimmigkeiten bei dieser Gleichsetzung wird von STRÄTER gewarnt ([168], S. 31 ff.). Die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler zu den drei Ebenen dieses Modells repräsentiert eine Vereinfachung, die zumindest nicht völlig frei von Risiken ist. Sämtliche Ansätze, die auf dieser Zuordnung basieren, wie z.B. einige HRA-Verfahren oder Ansätze aus der Eisenbahntechnik, enthalten ein Risiko, bezüglich menschlicher Zuverlässigkeit zu nicht einwandfreien Ergebnissen zu gelangen.

Modellierungen zur menschlichen Informationsverarbeitung müssen über eine sequentielle Darstellung hinausgehen. Zur Abbildung des kognitiven Verarbeitungszyklusses eignet sich die Modellierung durch eine Schleife. Abbildung 4.5 zeigt die kognitive Informationsverarbeitungsschleife nach STRÄTER [168] (in deutscher Sprache siehe [169]). Als Basis wird ein Ablauf zwischen Wahrnehmung (links) und Handlung (nach unten) verwendet. Die Verarbeitung läuft nicht sequentiell, sondern in einer Schleife über die gespeicherten Ziele und Vorerfahrungen ab. Nach der Wahrnehmung eines Signals etwa aktiviert der Entscheidungskern den Eingang in die Schleife, zunächst nur heuristisch vorgeprüft. Die Wahrnehmungsinhalte gelangen zu den Konzepten, Schemata und Handlungsmustern. Der menschliche Bediener leitet über gespeicherte Handlungsschemata und Konzepte Handlungsziele ab (rechts

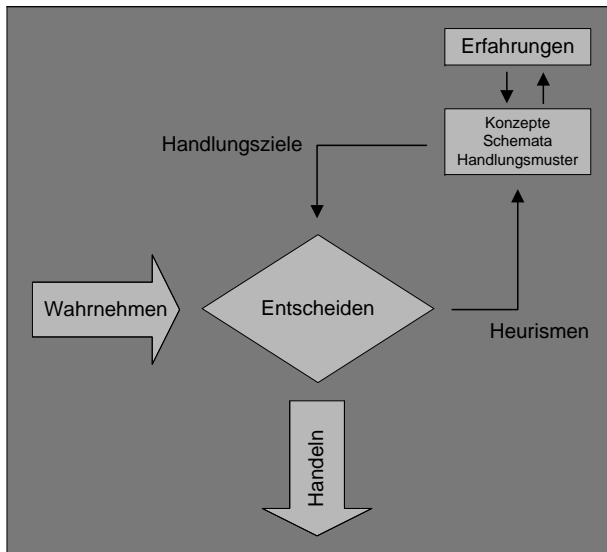


Abbildung 4.5: Modell der Informationsverarbeitung nach STRÄTER [168] und [169]

oben in der Darstellung). Großen Einfluss hat hier der kognitive Langzeitspeicher, die Erfahrungen. Mit den entwickelten Handlungszielen (und wahrnehmungsrelevanten Konzepten) erreicht der Prozess wieder den Entscheidungskern. Dort können nochmals Wahrnehmungen in die Entscheidung einbezogen werden und die Schleife nochmals beschritten werden. Im Entscheidungskern werden die extern erhaltenen Informationen und intern in den Konzepten repräsentierten Ziele miteinander verglichen. Liegt eine Übereinstimmung vor, wird im letzten Schritt (Pfeil nach unten) die Handlung umgesetzt. Es handelt sich beim Entscheidungskern aus kognitiver Sicht um einen *Vergleich*, der, wenn z.B. nach einer Wahrnehmung noch keine Ziele vorliegen, zunächst den Eingang in die Schleife aktiviert. Zu beachten ist, dass Handlungen nicht nur durch die Wahrnehmung aktiviert werden können, sondern auch aus dem eigenen Wissen heraus. In solchen Fällen, z.B. bei überwachenden Tätigkeiten, startet der Prozess bei den Handlungsmustern rechts oben in der Abbildung. Der Beginn einer Aufgabenbearbeitung durch den Menschen selbst ohne eine Wahrnehmung und das mehrfache Durchlaufen der Verarbeitungsschleife repräsentieren Phänomene, die (im Gegensatz zur rein sequentiellen Modellierung) sehr gut durch dieses Modell abgebildet werden können.

Dieses Modell kann auch mit der Darstellung des Mensch-Maschine-Systems zuvor verknüpft werden. Es handelt sich dann gewissermaßen um eine Lupe auf den menschlichen Bediener und seine Informationsverarbeitung, eingebettet in die entsprechende Box in Abbildung 4.3. Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit kommt aufgrund seiner Aktualität dieses Modell der Informationsverarbeitung zur Anwendung. Es fußt auf Erkenntnissen aus der Kognitionswissenschaft und ist auch ohne psychologisches Fachwissen leicht verständlich.

4.4 Entwicklung von Modellen für den Eisenbahnverkehr

Um die menschliche Zuverlässigkeit an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr bewerten zu können, müssen zunächst die Interaktionen zwischen Menschen und Maschinen genau bekannt sein. Es handelt sich also um die Definition der Mensch-Maschine-Systeme von Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter. In diesem Abschnitt werden dafür die bereits dargestellten Modelle auf die Arbeitsplätze im Eisenbahnverkehr transferiert angewendet. Zunächst wird ein systemtechnisches Modell für den gesamten Eisenbahnverkehr vorgestellt, später eine Modellierung einzelner Arbeitssysteme mit Blick auf die externen Einflüsse auf die menschliche Zuverlässigkeit. Die häufig nicht einheitlich verwendeten Begriffe im Bereich *Human factors* werden somit strukturiert. Die systematische Aufbereitung kann in qualitativen Verlässlichkeitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr in der Praxis genutzt werden.

Für die Steuerung des Eisenbahnsystems ist im Moment des Betriebsgeschehens der Einfluss der Triebfahrzeugführer, Fahrdienstleiter und Disponenten zentral. Diese Mitarbeiter interagieren in ihren Arbeitssystemen direkt mit dem technischen System Bahn. Zusätzlich interagieren diese Mensch-Maschine-Systeme direkt miteinander. Ordnet man sie in vereinfachter Form übereinander an, erhält man die kompakte Darstellung in Abbildung 4.6.

Der Triebfahrzeugführer arbeitet mit den interaktiven Systemen im Führerstand, die die Oberflächen der zugseitigen, technischen Systeme sind. Zusätzlich erhält er über die streckenseitigen Signale Nachrichten von der Eisenbahninfrastruktur (diagonaler Pfeil). Der Fahrdienstleiter befindet sich in Interaktion mit den Stellwerks-oberflächen, d.h. infrastrukturseitiger Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik. Im Bedarfsfall kommuniziert er über den Zugfunk mit einem oder mehreren Triebfahrzeugführern. Die Disponenten interagieren in erster Linie mit den Fahrdienstleitern

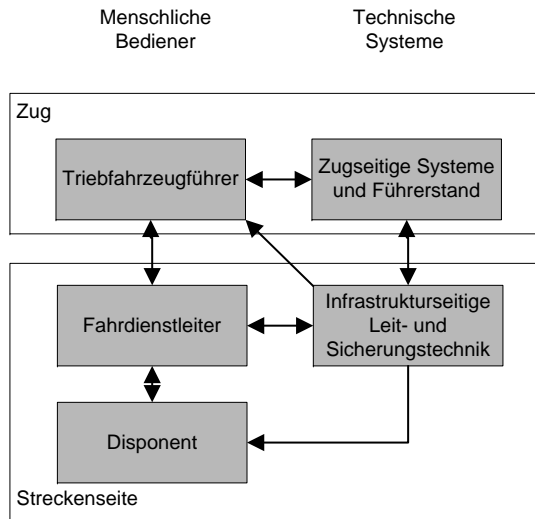


Abbildung 4.6: Modellierung der Interaktionen zwischen Menschen und technischen Systemen im Eisenbahnverkehr

und der streckenseitigen Technik. Sonderfälle wie z.B. die Betätigung elektrisch ortsbedienter Weichen durch Rangierlokführer sollen hier nicht betrachtet werden, der Fokus liegt auf dem Zugbetrieb auf modernen Hauptbahnen.

Wird der Fokus auf den Triebfahrzeugführer gelegt, lassen sich erstens die Interaktionen mit dem Fahrdienstleiter als Input von außen für das Mensch-Maschine-System verstehen. Zweitens sind die Signalbegriffe der Streckensignale Teil des technischen Systems, wenn in der Modellvorstellung die technischen Systeme nicht getrennt werden. Mit anderen Worten, das Mensch-Maschine-System des Triebfahrzeugführers umfasst nicht nur den Führerstand, sondern auch die streckenseitigen Signale. Diese Einteilung ist wichtig, denn sie ist nicht immer auf den ersten Blick offensichtlich. Der Fahrdienstleiter befindet sich außerhalb des Mensch-Maschine-Systems des Triebfahrzeugführers. Interaktionen mit ihm werden direkt abgebildet statt über technische Systeme, auch wenn diese dabei zu Hilfe genommen werden. Abbildung 4.7 stellt dieses System dar. Zur Vereinfachung ist der Disponent in dieser Darstellung entfallen.

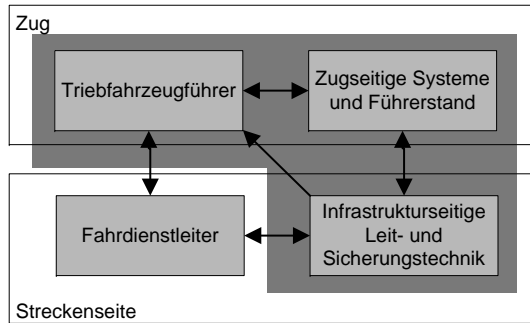


Abbildung 4.7: Mensch-Maschine-System des Triebfahrzeugführers (dunkel hinterlegt)

Für die komplexe Modellierung der Mensch-Maschine-Systeme und ihrer Interaktionen im Eisenbahnverkehr müssen die Arbeitssysteme in das Netzwerk der Informations- und Aufgabeneingänge und -ausgänge eingebettet werden. In Abbildung 4.8 ist eine Verknüpfung der formalen Beschreibung von Mensch-Maschine-Systemen (Abbildung 4.3) und den Interaktionen im System Bahn (Abbildung 4.7) dargestellt. Dafür wird wie bereits zuvor auf eine Modellierung des Disponenten verzichtet, da seine Tätigkeit in der Regel keine sicherheitsrelevanten Aufgaben enthält. Die der Regelungstechnik ähnelnde Notation wird bei der Verschmelzung beibehalten, der zweite Rückmeldungsstrang und die Auftragserteilung und -erledigung fallen jedoch zugunsten einer überschaubaren Darstellungsweise weg. In dieser Modellierung ist zu erkennen, dass das Systemelement Triebfahrzeugführer prinzipiell vier Informationseingänge aufweist: Aufgabe, Rückmeldung vom technischen System, Anzeigen von der streckenseitigen Infrastruktur und Meldungen vom Fahrdienstleiter.

Wie zuvor befinden sich die leistungsbeeinflussenden Faktoren in der *Umgebung*, zeitabhängig veränderliche Informationen und Bedingungen hingegen in der *Situation*. Die Situation ist hierbei für Fahrdienstleiter und Triebfahrzeugführer gleich. Eine *Gesamtaufgabe* ist in diesem Modell situationsbezogen und lautet beispielsweise *Einen Zug aus einem Bahnhof ausfahren*. Die *Aufgabe* des Fahrdienstleiters ist in diesem Fall die Einstellung einer Fahrstraße für diese Zugfahrt, der Triebfahrzeugführer muss (neben anderen Teilaufgaben) die Zugkraft während der Ausfahrt aus dem Bahnhof einstellen. Auch eine Abstraktion über mehrere Situationen hinweg

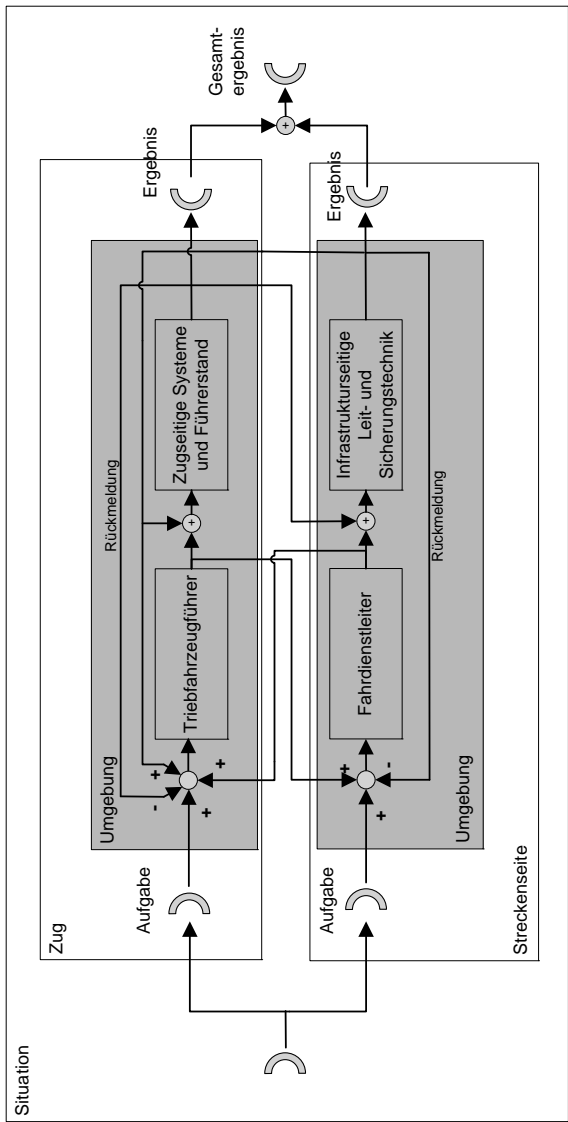


Abbildung 4.8: Komplexe Mensch-Maschine-Interaktion an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr

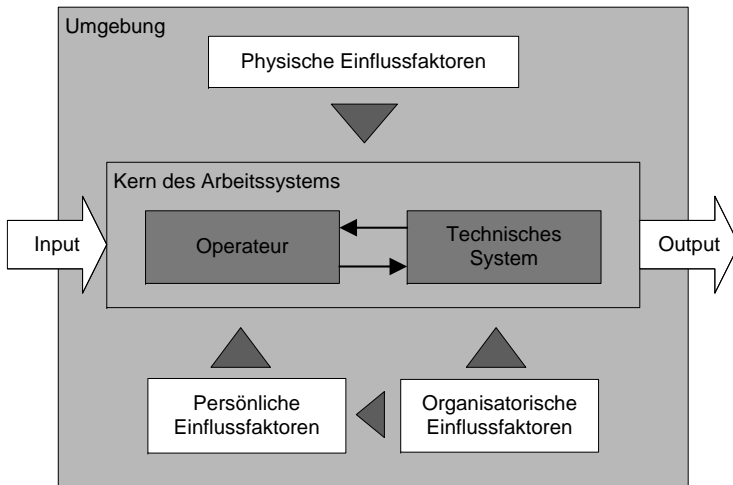


Abbildung 4.9: Modellierung des Arbeitssystems mit Fokus auf leistungsbeeinflussenden Faktoren

ist möglich: die Gesamtmission für Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter lautet dann *sicheren, pünktlichen und effizienten Eisenbahnbetrieb durchführen*.

Die vorherigen Modellierungen legten das Augenmerk auf die Interaktionen zwischen Menschen und Maschinen. Für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit muss ein zweiter Fokus auf die leistungsbeeinflussenden Faktoren in der Umgebung gelegt werden. Hierfür wird eine Modellvariante für das individuelle Arbeitssystem vorgestellt, die dieser Perspektive Rechnung trägt. Für diese Modellierung wird über die Unterscheidung zwischen Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter hinweg abstrahiert. Das Modell ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

Das Mensch-Maschine-System wird hier als integrierter Kern des Arbeitssystems verstanden, geprägt durch eine dynamisch veränderliche, horizontale Achse. Informationen von außen (von links in Abbildung 4.9) werden durch das System aufgenommen, verarbeitet und gespeichert, sodass – am Beispiel des Triebfahrzeugführers – die sichere und effiziente Steuerung der Zugfahrt als Ergebnis (Output rechts) verstanden werden soll. Es ist zu beachten, dass in diesem Modell Informationen von außen nicht notwendigerweise zunächst an den menschlichen Bediener

gelangen, sondern im Arbeitssystemkern auch zunächst vom technischen System aufgenommen werden können.

Der Kern des Arbeitssystems wird durch Faktoren der Umgebung beeinflusst (oben und unten in der Darstellung). Die Umgebung wird charakterisiert durch die leistungsbeeinflussenden Faktoren, entsprechend der *performance shaping factors* der HRA-Verfahren. Letztlich handelt es sich bei diesen Einflussfaktoren um Phänomene an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr, von denen zahlreiche bei der Analyse des Stands der Forschung in Kapitel 2 angesprochen wurden.

Die Umgebungsfaktoren unterliegen – verglichen mit den wechselnden Eingangsinformationen – einer deutlich geringeren Variabilität, sie sind für eine Arbeitsschicht in der Regel recht stabil. Die Umwelt wird in der Regel durch das Mensch-Maschine-System nur wenig beeinflusst ([55], S. 605). Die Pfeilrichtung von der Mitte zu den oben und unten angeordneten Umgebungsfaktoren soll daher vernachlässigt werden.

Die Einflussfaktoren können in drei Kategorien eingeteilt werden, deren Elemente im folgenden Abschnitt eingehend beleuchtet werden:

- Physische Einflussfaktoren
- Persönliche Einflussfaktoren
- Organisatorische Einflussfaktoren

Ein Grundgedanke dieser Modellierung ist die Trennung zwischen veränderlichen und abhängigen Variablen, also zwischen Umgebungsfaktoren und dem diesbezüglich *reaktiven* Kern des Arbeitssystems. Das Modell bietet eine Entzerrung der leistungsbeeinflussenden Faktoren. In diesem Zuge werden komplexe Abhängigkeiten zwischen den Umgebungsfaktoren untereinander (wie sie bei vielen HRA-Verfahren mindestens implizit bestehen) aufgelöst und der Umgang im Sinne einer handhabbaren Methodik vereinfacht. Es soll unterschieden werden zwischen *Stellschrauben*, mit deren Veränderung die Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems verbessert werden kann (*außen* in Abbildung 4.9), sowie abhängigen Größen im Zentrum, die von außen nicht direkt zu beeinflussen sind (sondern im allgemeinen von den veränderlichen Größen mitbestimmt werden). Bei der Modellierung und Trennung muss teilweise eine gewisse Vereinfachung in Kauf genommen werden, um eine Darstellung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu ermöglichen. Es soll nur noch bei unabhängigen Größen von *performance shaping factors*, also leistungsbeeinflussenden Faktoren, gesprochen werden.

Menschliche Reaktionen wie nachlassende Aufmerksamkeit oder Stresserleben werden als abhängige Größen, quasi *innerhalb des Menschen* verstanden. Eine geringe Aufmerksamkeit oder eine hohes Stresserleben haben daher beispielsweise einen direkten Einfluss auf die menschliche Zuverlässigkeit bei der Bedienung des technischen Systems. Sie sind auch aufgrund ihrer geringen objektiven Messbarkeit *keine* Stellschrauben. Unter die abhängigen Größen fallen z.B. die folgenden Phänomene:

- Beanspruchung
Belastung ist entsprechend die Menge der äußeren Einflussfaktoren.
- Stresserleben
Stresserleben ist das subjektive Ergebnis auf das Wirken der *Stressoren* von außen.
- Aufmerksamkeit
Müdigkeit und Motivation sind Beispiele der (weniger dynamischen) äußeren Einflussfaktoren, die die Aufmerksamkeit in einer bestimmten Situation beeinflussen.
- Situationsbewusstsein
Situationsbewusstsein ist ein Konstrukt zur Beschreibung des Grades des Verständnisses von Prozessen, die um den menschlichen Bediener herum ablaufen. Es wird definiert als die Wahrnehmung von Umgebungselementen, das Verständnis deren Bedeutung und die Projektion deren Status in die nahe Zukunft [44]. Das Situationsbewusstsein wird aufgrund seiner geringen Greifbarkeit in dieser Arbeit nicht weiter verwendet, bezüglich einer Verbindung zu Triebfahrzeugführern jedoch siehe [52].
- Risikobewusstsein
Das individuelle Risikobewusstsein wird hier als Phänomen verstanden, auf das organisationsbezogene Faktoren wie die Sicherheitskultur im Unternehmen und das weniger dynamische, grundsätzliche Sicherheitsbewusstsein des menschlichen Bedieners wirken. Erst über das Risikobewusstsein erhalten diese externen Faktoren eine Schnittstelle zur menschlichen Zuverlässigkeit.

Charakterisierend für diese Modellierung ist die fehlende Integration von aufgabenbezogenen Randbedingungen. Die Komplexität einer Aufgabe zum einen und die dafür zur Verfügung stehende Zeit zum anderen können in diesem Modell weniger abgebildet werden und müssen separat betrachtet werden. Die später entworfene Analyse mit dem Ansatz der Mensch-Barrieren-Interaktion, der dieses Modell verwendet, adressiert die beiden Einflüsse daher direkt im ersten Bewertungsschritt.

4.5 Leistungsbeeinflussende Faktoren im Eisenbahnverkehr

Auf Basis des zuvor vorgestellten Modells ist eine Trennung zwischen den leistungsbeeinflussenden Faktoren und der resultierenden Zuverlässigkeit des Mensch-Maschine-Systems möglich. Für Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit müssen die drei Bereiche der leistungsbeeinflussenden Faktoren noch weiter herunter gebrochen werden. Außerdem wird in diesem Abschnitt eine Modell zur Visualisierung der Wirkungszusammenhänge vorgeschlagen.

Die unabhängigen Größen (leistungsbeeinflussende Faktoren oder *performance shaping factors*) repräsentieren Eigenschaften und Größen aus zahlreichen Bereichen, die aus der Umgebung heraus auf den Kern des Arbeitssystems wirken. Sie sind stets zentral für Bewertungen zur menschlichen Zuverlässigkeit, da mit ihrer Hilfe Basiswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Situation angepasst werden können.

Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht über die wesentlichen leistungsbeeinflussenden Faktoren für Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter. Sie basieren auf einer Meta-Analyse, die mit den *performance shaping factors* des HRA-Verfahren THERP [171], den Angaben aus der VDI-Richtlinie 4006 zur menschlichen Zuverlässigkeit ([182], [183]) sowie dem eisenbahnspezifischen HUSARE-Toolkit [88] durchgeführt wurde. Ziel war es, eine handhabbare Menge von Faktoren für den Eisenbahnverkehr herauszuarbeiten. Bestehende Zusammenstellungen von leistungsbeeinflussenden Faktoren waren zu komplex und nicht auf den Eisenbahnverkehr angepasst. Zusätzlich bestanden viele Abhängigkeiten zwischen den Faktoren untereinander. Bei der Erstellung der Faktorenliste für den Eisenbahnverkehr konnten einige Einflussfaktoren der existierenden Verfahren nicht berücksichtigt werden. Grund dafür ist die hier bewusst vorgenommene Entkoppelung von veränderlichen und abhängigen Variablen. Zu beachten ist auch, dass es sich bei der Aufgabenkomplexität und der für die Aufgabe zur Verfügung stehenden Zeit um besonders zentrale Einflussgrößen handelt, die die Handlungszuverlässigkeit sehr direkt und in einem recht hohen Maße beeinflussen. Im Sinne des Modells des Arbeitssystems (Abbildung 4.9 auf Seite 88) beeinflussen diese aufgabenbezogenen Faktoren zwar die Leistung des Mensch-Maschine-Systems, sind jedoch im Kern des Arbeitssystems angeordnet. Sie werden im Rahmen späterer Entwicklungen dieser Arbeit zusammen mit der Aufgabe analysiert.

Zu welchem Grad ein Einflussfaktor die Leistung des Mensch-Maschine-Systems beeinflusst, mit anderen Worten in welcher Höhe er die menschliche Zuverlässigkeit

Physische Faktoren	
<ul style="list-style-type: none"> • Anthropometrische Gestaltung des Arbeitsplatzes • Arbeitsumweltbedingungen • Anordnung und gebrauchstaugliche Gestaltung der interaktiven Systeme 	
Personelle Faktoren	
Individuelle Faktoren	Beeinflusste Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Alter, Geschlecht • Intelligenz/Bildungsniveau • Gesundheit • Anspannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Müdigkeit • Fachwissen (Regel-, Strecken-, Fahrzeug-/Stellwerkskenntnis) • Erfahrung • Motivation • Sicherheitsbewusstsein
Organisatorische Faktoren	
Mitarbeiterbezogene Faktoren	Grundsätzliche Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Tages- und Wochendienstplanung • Führungskultur (Lohn, Anerkennung, Organisationsstruktur) • Ausbildung • Training und Weiterbildung • Soziale Bedingungen • Sicherheitskultur 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsanweisungen, Richtlinien, Normen • Arbeitsmethoden und Prozeduren

Tabelle 4.1: Leistungsbeeinflussende Faktoren (unabhängige Größen)

begünstigt oder beeinträchtigt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig beantwortet werden. Hierfür sind für jeden Einfluss gesondert umfangreiche arbeitswissenschaftliche Studien an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr vonnöten. Die Grundlagen für eine solche Analyse wurden mit dem Zusammentragen der zugehörigen Literatur in Kapitel 2 gelegt. Anhaltspunkte könnten auch die quantitativen Angaben zu *performance shaping factors* in der Methode rail HEQ bieten [56], [131].

Zur Aufstellung in Tabelle 4.1 sind noch folgende Randbedingungen zu beachten: die drei Mengen der physischen, persönlichen und organisatorischen Einflussfaktoren sind zum Teil noch einmal gespalten, da es organisatorische Einflüsse gibt, die eine Querverwirkung auf persönliche Faktoren besitzen, sowie solche Faktoren existieren, die direkt auf den Kern des Arbeitssystems wirken. Sämtliche Mengen sind um den Kern in der Weise angeordnet, wie weiter oben in Abbildung 4.9 bereits dargestellt.

Einflussfaktoren sind jeweils als Maß der Erfüllung einer bestimmten Maßgabe zu verstehen, d.h. stellen einen mindestens hilfsweise quantifizierbaren Parameter dar. Diese Feststellung ist zentral, da die Formulierung der Einflussfaktoren diesen Charakter nicht immer widerspiegelt. Beim Einflussfaktor *Training* sind beispielsweise *Länge und Ausbildungstiefe des Trainings* und *Frequenz des Trainings* gemeint.

In keinem Fall sind Aufstellungen von Einflussfaktoren endlich, da es letztlich immer Faktoren gibt, deren Einfluss sehr gering ist. Die vorgestellte Menge dient daher mit einer Beschränkung auf die wichtigsten Faktoren als Maßgabe, die im Anwendungsfall noch ergänzt werden kann.

Aus der Modellierung des individuellen Arbeitssystems und den leistungsbeeinflussenden Faktoren lassen sich Wirkungsbeziehungen ableiten. Diese Wirkungsbeziehungen zwischen variablen und abhängigen Größen lassen sich in Ursache-Wirkungs-Diagrammen darstellen, die von DIN EN 50126-1 für die Berücksichtigung von menschlichen Faktoren vorgeschlagen werden [32]. Obwohl die Einflüsse von außen hilfsweise quantitativ einschätzbar sind, lassen sich die Ausmaße der jeweiligen Wirkungsbeziehungen nur schwer mit quantitativen Angaben hinterlegen. Somit eignet sich die im Folgenden vorgeschlagene Darstellung nur für beschreibende und qualitative Aussagen. Durch die anschauliche Darstellungsweise unterstützen die Ursache-Wirkungs-Diagramme auch die strukturierte Bearbeitung der von DIN EN 50126-1 lediglich als Liste vorgeschlagenen, zu berücksichtigenden Phänomene im Bereich menschlicher Einflussfaktoren auf Verlässlichkeit von Eisenbahnsystemen.

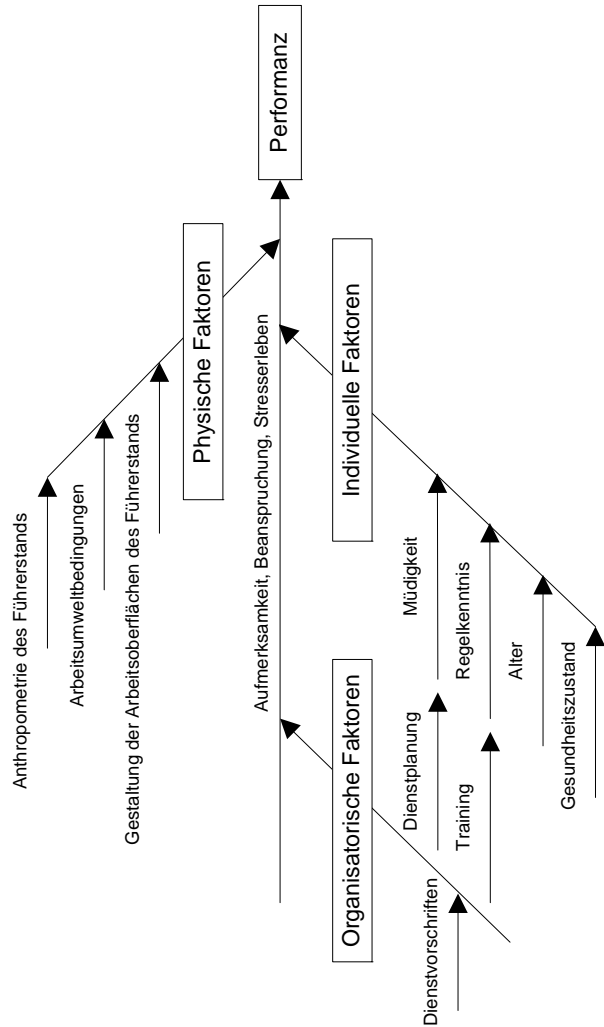


Abbildung 4.10: Beispiel für ein Ursache-Wirkungs-Diagramm mit einigen leistungsbeeinflussenden Faktoren

Wenngleich Ursache-Wirkungs-Diagramme mit einer Baumstruktur eine ähnliche Form wie Fehlerbäume aufweisen, ist eine direkte Zuordnung ihrer Inhalte problematisch. Die leistungsbeeinflussenden Faktoren und die abhängigen Größen im menschlichen Bediener lassen sich nicht durch Funktion oder Ausfall abbilden. Der Ansatz von DHILLON, Fehlerbäume mit leistungsbeeinflussenden Faktoren zu füllen ([29], S. 81 ff.), weist daher Schwächen auf.

Die Nutzung der Ursache-Wirkungs-Diagramme erfolgt hier also zur Beschreibung von wesentlichen Einflüssen. Als Wirkung oder beeinflusste Größe soll das Gesamtergebnis des Arbeitssystems aus Abbildung 4.9 herangezogen werden. Setzt man die Leistungsfähigkeit des technischen Systems als konstant voraus, reduziert sich die beeinflusste Größe auf die Performanz des Menschen, also die menschliche Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit. Als Einflussgrößen sollen die leistungsbeeinflussenden Faktoren verstanden werden.

Als Beispiel für eine Anwendung der Ursache-Wirkungs-Diagramme für das Arbeitssystem eines Triebfahrzeugführer ergibt sich Abbildung 4.10. Die Zusammenhänge werden anschaulich sichtbar. In der Abbildung zeigen sich jedoch auch die Grenzen dieser Darstellungsform: eine strenge Baumstruktur lässt Querbeziehungen nicht zu. Für die Darstellung von organisatorischen Einflüssen auf individuelle Faktoren ist eine gute Übersichtlichkeit noch gegeben. Dieses Diagramm kann vom Praktiker für den jeweiligen Anwendungsbereich im Eisenbahnverkehr entsprechend angepasst werden. Es dient damit als Werkzeug zur Darstellung für Zusammenhänge im Bereich menschlicher Einflussfaktoren in Arbeitssystemen im Eisenbahnverkehr.

4.6 Resümee

Insgesamt wurden in diesem Kapitel Modelle und Werkzeuge aufgezeigt, die dem Praktiker für eine qualitative Beschreibung menschlichen Einflusses auf die Verlässlichkeit zur Verfügung stehen. Es wird davon ausgegangen, dass es Ziel des Anwenders ist, ein wenig fehleranfälliges Arbeitssystem zu gestalten bzw. ein existierendes Mensch-Maschine-System bezüglich seiner Zuverlässigkeit zu bewerten. Der Praktiker kann die Modelle in Verlässlichkeitsbetrachtungen integrieren. Den Forderungen von DIN EN 50126-1 zur qualitativen Berücksichtigung menschlicher Faktoren kann somit in günstiger Weise begegnet werden. Die erläuterten Modelle dienen auch als Grundlage für die neue Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit, die in den folgenden Kapiteln entwickelt wird.

Mit der tabellarischen Modellierung menschlichen Verhaltens (Tabelle 4.1) steht dem Anwender eine Systematik zur Verfügung, mit der künftig alle Fehlerarten sorgfältig unterschieden und betrachtet werden können. Ein solches Modell ist auch unerlässlich für die qualitative Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit, denn es ist in der Lage, die Auswirkungen von Fehlhandlungen in bestimmten Kontexten zu systematisieren. Zur Modellierung von Mensch-Maschine-Systemen wurde die klassische, duale Interaktion zwischen Mensch und Maschine erläutert. Bei komplexen Tätigkeiten muss die menschliche Informationsverarbeitung durch ein eigenes, ebenfalls vorgestelltes, Modell beschrieben werden. Mit der Trennung der Umgebungsgrößen des Mensch-Maschine-Systems in unabhängige Variablen (leistungsbeeinflussende Faktoren) und abhängige Variablen wird eine Systematik in das Feld *Human factors* hineingebracht, die dem Praktiker vielleicht nicht immer vertraut ist. Begriffe wie *Belastung* und *Beanspruchung* oder auch *Sicherheitskultur im Unternehmen* können mithilfe der vorgestellten Modelle in den Kontext des Arbeitssystems eingeordnet werden. Die Systematik dient in der Praxis auch zum Ausräumen von gelegentlichen, begrifflichen Missverständnissen zwischen Ingenieuren und Psychologen.

Mit der Übertragung der Mensch-Maschine-Systeme auf den Eisenbahnverkehrskontext wird dem Praktiker ein Leitfaden gegeben, das Arbeitssystem im Anwendungsfall systematisch zu bewerten. Der erste Schritt ist die Wahl praktischer Systemgrenzen für das betrachtete Mensch-Maschine-System. Für den Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers beispielsweise sind Führerstand und Streckensignale Teil des technischen Systems (Maschine). Zahlreiche Komponenten des Triebfahrzeugs, mit denen der Bediener nicht direkt interagiert, wie z.B. der Stromabnehmer, können bei der Modellierung des Arbeitssystems entfallen. Als zweiter Schritt für den Anwender wird die Betrachtung der leistungsbeeinflussenden Faktoren empfohlen. Hier kann der Fokus auf die Faktoren bzw. Stellgrößen gelegt werden, bei denen der Anwender den größten Einfluss auf die menschliche Zuverlässigkeit im betrachteten Mensch-Maschine-System sieht. Die Wahl genau dieser Systemgrenzen bei der Modellierung des Arbeitssystems ist auch Grundlage für die Entwicklung einer Methodik zur qualitativen Bewertung der Fehleranfälligkeit von Mensch-Maschine-Systemen ab dem folgenden Kapitel.

5 Nutzung der Sicherheitsbarrieren für die Methodenentwicklung

Auf dem Weg zu einer Analytik zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit wird in diesem Kapitel das Modell der Sicherheitsbarrieren vorgestellt. Zu diesem Ansatz wird kurz der Stand der Forschung bilanziert, existierende Klassifikationen und Bewertungsmöglichkeiten werden in Abschnitt 5.1 beschrieben. Der Gedanke der Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren ist anschließend die Grundlage für die Entwicklung der Mensch-Barrieren-Interaktion ab dem zweiten Unterkapitel. Dort werden die Analysekomponenten im Überblick vorgestellt. Es ist die Grundüberlegung für die Analyse, dass Barriereigenschaften, die den Umgang für den menschlichen Bediener komplexer machen, zu einer höheren Fehleranfälligkeit führen. Erste Komponente der Analyse ist in jedem Fall eine Identifikation der Barrieren. Hierfür werden im dritten Unterkapitel Ansätze vorgestellt. Schließlich wird ein zweiteiliges Verfahren mit einer Methode der Sicherheitstechnik und einer Analyse aus der Arbeitspsychologie vorgeschlagen und es werden einige Randbedingungen bei der Barrierenidentifikation diskutiert.

Dieses Kapitel liefert nach den Überlegungen zur grundsätzlichen Modellierung von Mensch-Maschine-Interaktionen (Kapitel 4 als erste Säule) mit dem Ansatz der Barrieren die zweite Säule für die Analytik zur Bewertung der Mensch-Barrieren-Interaktion.

5.1 Grundlagen zu Barrieren

Um Sicherheitsfunktionen zu modellieren, wird der relativ weit verbreitete Ansatz der Barrieren herangezogen. Eine solche Modellierung ist notwendig, um später Aussagen darüber treffen zu können, welchen Einfluss der menschliche Bediener auf die Sicherheitsfunktion hat. Die Idee der Barrieren dient also als Hilfsmittel zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit in bestimmten Kontexten.

Ursprünglich stammt die Idee der Barrieren aus der Unfallursachenanalyse. Grundgedanke ist, dass beim Auftreten eines Unfalls bestimmte Sicherheitsmechanismen (Barrieren) versagen oder umgangen werden. Mit anderen Worten, Barrieren schützen ein funktionierendes System vor dem Ausbrechen in unsichere Zustände. Aufbauend auf der Unfallursachenanalyse wird in sicherheitstechnischen Betrachtungen versucht, die Barrieren zu identifizieren, handhabbar zu machen, sie evtl. zu visualisieren und sie hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu verbessern. Allerdings können nicht nur bestehende Barrieren angepasst werden, sondern auch neue hinzugefügt und so die Gesamtheit der Barrieren optimiert werden. Ziel ist, die Sicherheit zu erhöhen oder eine angemessene Sicherheit mit anderen, z.B. kostengünstigeren, Maßnahmen zu erreichen.

Der weit zurückgehenden Geschichte der Idee der Barrieren gibt HOLLNAGEL 2004 einen neuen Impuls [82], dessen Grundlagen in diesem Abschnitt besprochen werden. In dieser Arbeit werden Barrieren im Sinne der Definition von SKLET verstanden: Sicherheitsbarrieren werden definiert als physische oder nicht-physische Mittel, die geplant zur Verhinderung, Beherrschung oder Abschwächung unerwünschter Ereignisse oder Unfälle eingesetzt werden [162]. Wenngleich in der Literatur gelegentlich eine Unterscheidung zwischen *Sicherheitsbarrieren* und Barrieren gegen unerwünschte Betriebszustände (z.B. aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten) gefunden werden kann, wird der Begriff Barriere in dieser Arbeit allein im Sinne von Vorkehrungen mit dem Ziel der Sicherheit verstanden.

Einen wesentlichen Dreh- und Angelpunkt besitzt die Idee der Barrieren mit dem so genannten *Schweizer-Käse-Modell*. REASON stellte ein Modell vor, in dem das Zusammenspiel mehrerer Ebenen von unfallbegünstigenden Randbedingungen, also z.B. latenten, organisatorischen Fehlern und aktiven Handlungsfehlern dargestellt wurde [135]. Diese Ebenen wurden später in Schichten aufgereiht, Fehler als Löcher dargestellt, so dass es über die Jahre zur Bezeichnung *Schweizer-Käse-Modell* kam. In den neueren Interpretationen des Modells wird meistens eine Trajektorie durch mehrere Ebenen (*Käsescheiben*) gezeigt, die von Gefährdungen zum Unfall führt (Abbildung 5.1). Die Abhängigkeiten der Schichten (oder Barrieren) untereinander und von organisatorischen Einflüssen werden dabei nicht so hervorgehoben, wie es die letzte Darstellung des Modells durch REASON selbst wiedergibt [137]. Eine Diskussion des Modells sowie seiner Vor- und Nachteile findet sich in [138].

Kerngedanke des Modells im Sinne von Barrieren ist die modellhafte Sichtbarmachung von Sicherheitsvorkehrungen, die die Trajektorie, also den Ereignisablauf, von Gefährdungen zum Unfall verhindern. Die Unterscheidung, ob es sich dabei

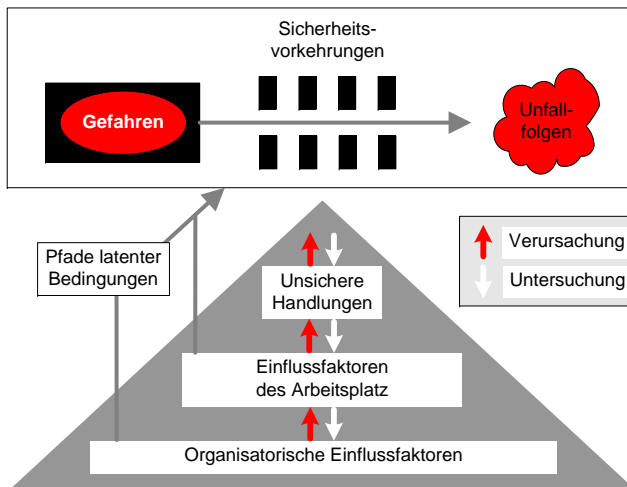
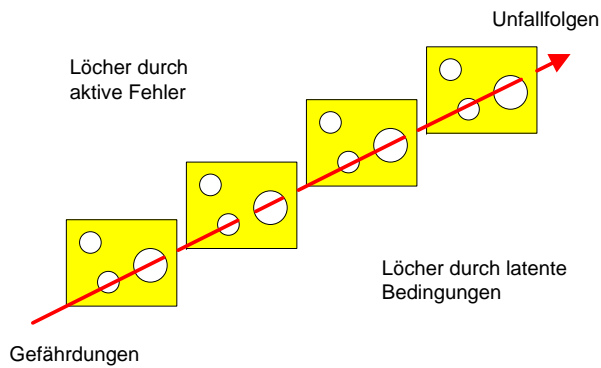


Abbildung 5.1: Ausprägungen des Schweizer-Käse-Modells von REASON

um Sicherheitsschichten mit Löchern oder hintereinander liegende *Barrieren* mit Fehlerpotenzial handelt, ist für die Modellvorstellung prinzipiell weniger bedeutsam. Es ist lediglich zu beachten, dass eine Modellierung als Sicherheitsschichten primär Verhütungs- und Behebungsfunktionen beschreibt und sich Beherrschungsfunktionen weniger gut darstellen lassen: sind beim *Schweizer Käse* alle Schichten durchbrochen, tritt der Unfall ein. Die schlechte Modellierbarkeit von Beherrschungsbarrieren liegt in der binären Betrachtung Abwehr oder Nicht-Abwehr im Schichtenmodell begründet. Aufgrund der größeren Dichte von Forschungsliteratur zu Barrieren und ersten, bereits existierenden Betrachtungen zum Einfluss des Menschen wird in dieser Arbeit das Konzept der Barrieren verwendet.

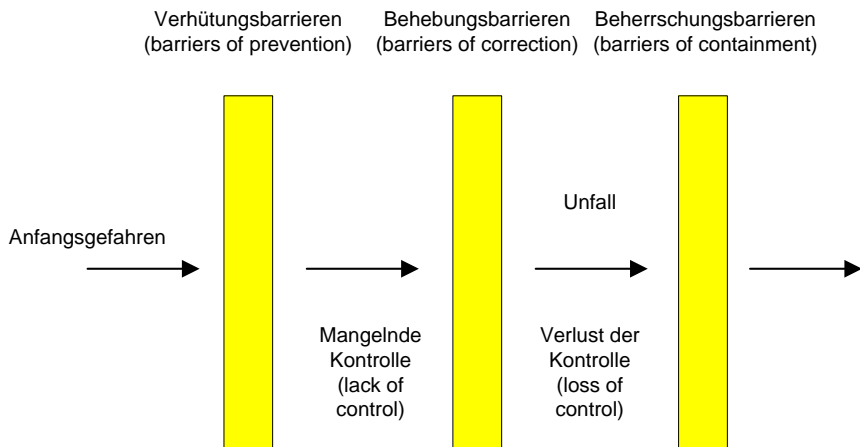


Abbildung 5.2: Prozess-Modell für Barrieren (nach POLET [124])

Die Achse von Gefährdungen bzw. von nicht-konformen Initialereignissen hin zu einem Unfall wird auch zur Klassifikation von Barrieren im Sinne eines Prozessmodells herangezogen. Es wird die Unterscheidung zwischen verschiedenen Stufen von Barrieren eingeführt [124], siehe Abbildung 5.2:

- Verhütungsbarrieren (Barriers of prevention) schützen davor, dass ein unerwünschtes, auslösendes Ereignis eintritt.
- Behebungsbarrieren (Barriers of correction) korrigieren das unerwünschte Auslösungsereignis und schützen vor dem Auftreten des Unfalls.
- Beherrschungsbarrieren (Barriers of containment) dämmen die Auswirkungen des Unfalls ein.

Hier besteht eine Korrelation zu den Begriffen der *aktiven* und *passiven Sicherheit* z.B. im Kraftfahrzeugverkehr, die sich in ähnlicher Weise auf die Unfallvermeidung zum einen und die Linderung der Folgen zum anderen beziehen. Diese Einteilung findet sich auch in den VDI-Richtlinien zur menschlichen Zuverlässigkeit [182].

Eine weitere Repräsentation des Flusses von Initialfehlern zu unerwünschten Konsequenzen stellt das *Bow-Tie-Model* dar. Es handelt sich um eine Verknüpfung von Fehlerbäumen und Ereignisbäumen. Dabei sind die Bäume jeweils um 90 Grad gedreht und an zentralen Punkten, unerwünschten Ereignissen, miteinander verknüpft. Zentral ist hierbei die Möglichkeit, Barrieren in Fehler- und Ereignisbäumen zu identifizieren und darzustellen, siehe Abbildung 5.3.

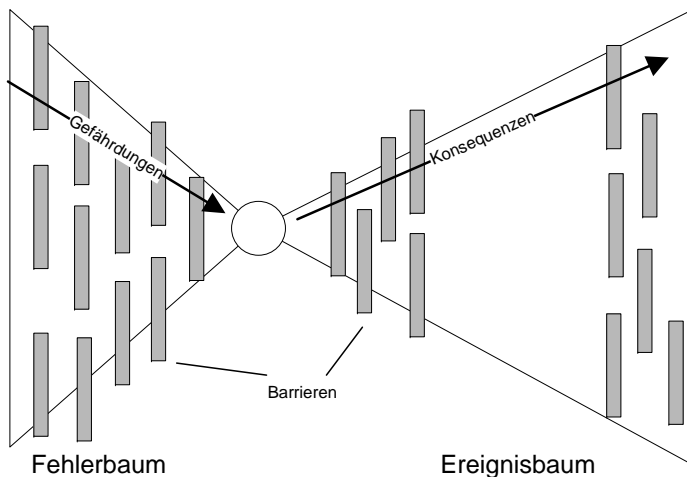


Abbildung 5.3: Bow-Tie-Model inklusive Verdeutlichung der Barrieren

Der Verbindungspunkt zwischen Fehlerbaum und Ereignisbaum lässt sich, generisch gesehen, auf der horizontalen Achse verschieben. Die Position hängt von der Definition des Ereignisses ab, an dem die Diagramme verknüpft werden (also Top-Event des Fehlerbaums und Start-Ereignis des Ereignisbaums). Hier soll der Verbindungspunkt im Bereich *Mangelnde Kontrolle* im Sinne von Abbildung 5.2 liegen, da im Eisenbahnsystem nur sehr wenige Beherrschungsbarrieren existieren. Würde man den Verbindungspunkt bei *Verlust der Kontrolle* anordnen, würde der Ereignisbaum nur die wenigen Beherrschungsbarrieren enthalten.

Neben der Klassifikation im Prozessmodell lässt sich zwischen *Barrierensystemen* und *Barrierenfunktionen* unterscheiden [82]. Eine Barrierenfunktion kann als die spezifische Art und Weise definiert werden, durch die die Barriere ihren Zweck erfüllt. Das Barrierensystem hingegen ist die organisationelle und/oder physische Struktur, ohne die die Barrierenfunktion nicht erreicht werden könnte. Eine Barriere kann aus mehreren Barrierensystemen bestehen. Der Begriff *Barrierensystem* kann in manchen Situation unglücklich gewählt erscheinen, denn es handelt sich beim Barrierensystem i.d.R. nicht um ein System mit verschiedenen Komponenten, sondern um ein einzelnes Gebilde. An der Terminologie wird jedoch aufgrund der großen Verbreitung in der Literatur festgehalten. Zusätzlich lassen sich Barrierensysteme (und schließlich auch Barrieren) in vier Kategorien einteilen, die im Folgenden erläutert werden. Parallel werden Beispiele gegeben: Barrierensysteme gegen das Herausfallen eines Fahrgasts aus einem Schienenfahrzeug.

- Physische Barrierensysteme verhindern ein Ereignis oder vermeiden die Folgen direkt durch ihre Anwesenheit. Sie blockieren oder hemmen die Bewegungen von Massen, Energien oder Informationen. Allgemeine Beispiele für physische Barrieren sind Mauern, Absperrungen, Behälter oder auch Feuerschutzvorhänge.

Beispiel gegen das Herausfallen: Geschlossener Waggonaufbau

- Funktionale Barrierensysteme errichten eine oder mehrere Bedingungen, die erfüllt sein müssen, bevor eine Aktion durchgeführt werden kann, z.B. logische oder zeitliche Sperre. Einige funktionale Barrieren verlangen von dem Benutzer eine Bedienhandlung, um in einen anderen Modus zu wechseln, andere wechseln den Zustand selbständig, abhängig von Umgebungsbedingungen. Eine funktionale Barriere bzw. ihr Status ist nicht immer sichtbar oder wahrnehmbar für den Menschen, obwohl das Vorhandensein einer solchen Barriere meistens angezeigt wird.

Beispiel: Türverriegelungssystem, Schlüssel

- Symbolische Barrierensysteme wirken auf indirekte Weise durch ihre Bedeutung. Das heißt, sie erfordern eine Interpretation durch einen Menschen. Symbolische Barrieren repräsentieren visuelle oder akustische Signale, Schilder, Warnungen, Alarme usw.

Beispiel: Warnschilder gegen das Hinauslehnen aus dem Fenster

- Immaterielle Barrierensysteme sind in den Momenten, in denen sie wirken, nicht physisch vorhanden. Ob die Barriere ihren Zweck erfüllt, hängt vom Wissen des Benutzers ab. Bei diesen Barrieren handelt es sich häufig um Regeln und Vorschriften, die von der Organisation eingeführt werden.

Beispiel: Regelungen gegen das Hinauslehnen oder gegen das Öffnen der Türen vor dem Stillstand des Zuges in den Beförderungsbedingungen

Zentral für die spätere Bewertung des menschlichen Einflusses ist die folgende Trennung: bei physischen und funktionalen Barrieren übt das Barrierensystem die Barrierenfunktion selbst aus. Symbolische und immaterielle Barrieren erfordern eine Aktion und erst die Ausführung der angeforderten Aktion stellt die Barrierenfunktion dar. Ein Prellbock etwa übt seine Barrierenfunktion durch seine Existenz aus. Eine Pfeiftafel für den Triebfahrzeugführer (Aufforderung zum Pfeifen vor einem Bahnübergang) repräsentiert das Barrierensystem einer symbolischen Barriere, die Betätigung des akustischen Warnsignals ist die Barrierenfunktion.

Stellt man das Prozessmodell wie in Abbildung 5.2 horizontal dar und die Klassifikation nach HOLLNAGEL auf einer vertikalen Achse, erhält man ein zweidimensionales Schema für die Einteilung von Barrieren. In Tabelle 5.1 geben die erste Zeile und Spalte das Schema wieder, gleichzeitig sind beispielhaft Barrieren gegen das zu schnelle Fahren, Entgleisungen und entsprechende Folgen eingetragen.

In das Schema lassen sich Barrieren eines bestimmten Kontextes eintragen. Dabei sind folgende Staffellungen möglich:

- Ort (z.B. Menge der Barrieren am Bahnhof, am Bahnübergang, auf freier Strecke)
- Funktion im Eisenbahnsystem (z.B. Menge der Barrieren zur Vermeidung eines unerwünschten Top-Ereignisses, etwa von zu hohen Geschwindigkeiten)
- Gefährdung (z.B. Menge der Barrieren, die das Risiko von Zusammenstößen zwischen Eisenbahnfahrzeugen minimieren)
- Etappe der Erschaffung (Staffelung nach dem Zeitpunkt, an dem die Barriere aufgebaut wird)
- Etappe der Wirkung bzw. Moment des Wirkens (Staffelung nach der Phase, in der die Barriere wirkt, z.B. Instandhaltung)
- Mensch, der geschützt wird (Personal, Fahrgast, Dritter)
- Mensch, der der Barriere gegenübersteht (Personal, Fahrgast, Dritter)
- Mensch, der die Einführung der Barriere verantwortet (Designer, Bediener, Vorgesetzter)

Die Tabelle eignet sich zur Visualisierung der Barrieren, ihres grundsätzlichen Typs und der Wirkungsphase im Prozessmodell. Ein *Barrierenkomplex* aus mehreren Barrieren gegenüber einer Gefährdung lässt sich in dieser Darstellung günstig ver-

	Verhütungsbarrieren (Barriers of prevention)	Behebungsbarrieren (Barriers of correction)	Beherrschungsbarrieren (Barriers of containment)
Physische Barrieren			Schutzschienen auf Brücken zur Vermeidung des Sturzes des Fahrzeugs
Funktionale Barrieren		Geschwindigkeitsprüfschnitte der PZB zur Zwangsbremmung bei überhöhter Geschwindigkeit	
Symbolische Barrieren	Anzeigen von Tacho, EBU-La und Hektometer tafeln zur Einhaltung der Streckengeschwindigkeit		
Immaterielle Barrieren	Regeln zur Anpassung der Geschwindigkeit		

Tabelle 5.1: Schema zur Einteilung von Barrieren – hier eingetragen einige Beispiele für Barrieren gegen zu schnelles Fahren, Entgleisungen und entsprechende Folgen

bildlichen und benachbarte, gemeinsam oder voneinander abhängig wirkende oder doppelte Barrieren lassen sich analysieren. Bei der tiefer gehenden Betrachtung einzelner, gesamter Ereignisabläufe weist die Tabelle als Werkzeug jedoch Schwächen auf, da nicht immer gleichzeitig nicht-konforme Initialereignisse, Unfälle und ihre Konsequenzen integriert werden können. Für solche Analysen sind Fehler- und Ereignisbäume besser geeignet.

Bei der Gestaltung und Evaluation sicherheitskritischer Systeme kann jederzeit der Ansatz der Barrieren verwendet werden. Bei der Bewertung existierender und Planung neuer Sicherheitsvorkehrungen ist die Frage nach der Qualität, den Charakteristika bzw. der Leistungsfähigkeit der neuen Systeme zentral. Für Barrieren sind daher Listen von Kriterien entwickelt worden, mit denen die Barrierensysteme bewertet werden können, siehe Tabelle 5.2.

Evaluierung der Qualität von Barrierensystemen nach HOLLNAGEL [84]	Charakterisierung der Leistung von Sicherheitsbarrieren nach SKLET [162]
<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz • Ressourcenverbrauch/Kosten • Robustheit/Zuverlässigkeit • Zeitverzug bei Umsetzung • Anwendbarkeit für sicherheitskritische Aufgaben • Verfügbarkeit • Komplexität der Barrierenbewertung • Unabhängigkeit von menschlichen Handlungen im Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionalität/Effektivität • Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit • Antwortzeit • Robustheit • Aktivierendes Ereignis oder Bedingung

Tabelle 5.2: Bewertung von Barrieren nach HOLLNAGEL und SKLET

Für die Analyse der technischen Qualitäten einer Barriere stehen in der Literatur Kriteriensätze zur Verfügung. Das eindimensionale Kriterium *Unabhängigkeit von menschlichen Handlungen im Betrieb* repräsentiert jedoch anscheinend die bisher einzige Größe, mit der die menschlichen Einflussfaktoren bei der Interaktion oder Ausführung der Barrieren bewertet werden können. Immaterielle und symbolische Barrieren gelten als abhängig von menschlichen Handlungen, funktionale und physi-

sche Barrieren als unabhängig. Letztere sind im Prinzip von menschlichen Einflüssen meistens sogar völlig entkoppelt.

Auch wenn darüber hinaus keine Einbeziehung der menschlichen Einflussfaktoren in Betrachtungen zur Barrierenqualität bekannt ist, so sind doch Veröffentlichungen zu menschlichen Fehlern bei der Interaktion mit Barrieren zu finden. Wenn der menschliche Bediener einen absichtlichen oder unbeabsichtigten Fehler begeht, entfernt oder unterdrückt er eine Sicherheitsbarriere: er verletzt zum Beispiel eine Regel oder deaktiviert einen Sicherheitsmechanismus [124]. Die Studie versucht, am Beispiel eines sehr abstrahierten Eisenbahnsystems die Wahrscheinlichkeit absichtlicher Fehler mittels dreier Kriterien zu bewerten: Vorteil und Kosten der Handlungsalternativen für den menschlichen Bediener (Benefit, Costs) und den resultierenden Sicherheitsverlust (Deficit). Grundsätzlich fokussieren sich die aufeinander aufbauenden Arbeiten der Universität Valenciennes zu diesem Thema auf absichtliche Fehler (s.a. [23]). Sie sollten auch Teil einer Sicherheitsbetrachtung sein, stehen jedoch bei einer klassischen Risikoanalyse nicht im Vordergrund.

Die Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren ist erstens weit verbreitet und leicht verständlich. Zweitens herrscht noch Potenzial, die Berücksichtigung menschlichen Einflusses auf die Barrierenfunktion weiter zu entwickeln. Diese beiden Punkte sind Motivation für die Nutzung der Barrieren für die Methodenentwicklung im folgenden Kapitel.

5.2 Ansatz und Vorgehensweise der entwickelten Methodik

Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen Analytik und Methodik ist das Auftreten von menschlichen Handlungen in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr. Dabei sollen drei Anwendungsfälle betrachtet werden, bei denen der größte Praxisbedarf vorliegt.

1. Qualitative Integration von menschlichen Einflussfaktoren in Sicherheitsbetrachtungen

Eine qualitative Integration menschlicher Einflussfaktoren in Sicherheitsbetrachtungen ist nach DIN EN 50126-1 bei neuen Systemen oder signifikanten Änderungen vorgeschrieben. Das Ziel ist eine Beschreibung des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine und die Identifikation von

RAMS-Faktoren, also Faktoren, die die Systemverlässlichkeit beeinflussen. Eine ähnliche Fragestellung liegt vor, wenn früh im Entwicklungsprozess verschiedene, konzipierte Sicherheitsvorkehrungen miteinander verglichen werden sollen. Für diesen Anwendungsfall ist eine qualitativ einwandfreie Beschreibung der Mensch-Maschine-Systeme und ihrer Sicherheitsfunktionen unabdingbar.

2. Systematischer Vergleich der Zuverlässigkeit von vorliegenden oder entworfenen Sicherheitsvorkehrungen

Der zweite Anwendungsfall repräsentiert einen Vergleich von bereits vorliegenden Sicherheitsvorkehrungen. Das Ziel solcher Betrachtungen kann der Nachweis eines bestimmten Sicherheitsniveaus im Rahmen des Risikoakzeptanzkriteriums *Mindestens gleiche Sicherheit* sein. Benötigt werden für diesen Fall Aussagen über die Zuverlässigkeit einer Sicherheitsfunktion eines Mensch-Maschine-Systems und Kriterien für einen systematischen Vergleich.

3. Quantitative Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit für quantitative Risikoanalysen

Eine quantitative Risikoanalyse ist nach DIN EN 50129 vorgeschrieben. Im Gegensatz zum Ausfall von technischen Systemen konnte die menschliche Zuverlässigkeit bislang nicht mit hinreichender Präzision geschätzt werden. Die Fragestellung dieses Anwendungsfalls ist die explizite, quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit eines Mensch-Maschine-Systems zum Einsatz einer Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler in der Fehlerbaumanalyse.

An die zu entwickelnde Methode muss auch der Anspruch gestellt werden, eine ganzheitliche Betrachtung der menschlichen Fähigkeiten vorzunehmen. Denn den menschlichen Einfluss lediglich in einem Zweig des Fehlerbaums zu betrachten, stellt eine sehr eingeschränkte Vorgehensweise dar. Die zu entwickelnde Methode muss versuchen, der Gefahr eines Tunnelblicks durch eine ganzheitliche Analyse der Sicherheitsfunktionen zu begegnen. Wichtigster Anknüpfungspunkt für die Entwicklung ist die Fehlerbaumanalyse, die von Gefährdungen und dagegen schützenden Barrieren ausgeht. Sämtliche menschliche Handlungen im Fehlerbaum sind sicherheitsrelevant, mit anderen Worten leisten eine Sicherheitsfunktion. Die zu entwickelnde Methode muss sich nur in zweiter Linie mit einer FMEA zusammenbringen lassen, da dort von Tätigkeiten und Aufgaben ausgegangen und auf Gefährdungen geschlossen wird.

Die menschliche Zuverlässigkeit soll in der hier vorgestellten Methode mit einem Mensch-Barrieren-Modell bewertet werden. Ziel ist dabei zunächst nicht die Angabe einer präzisen, quantitativen Fehlerwahrscheinlichkeit (Absolutwert), sondern die Bewertung auf einer Ordinalskala. Im Gegensatz zu einer Bewertung auf Nominalskala, also einer verbalen, qualitativen Beschreibung, soll mit einer Einteilung in Klassen mindestens ein Vergleich zwischen verschiedenen Ausprägungen ermöglicht werden. Sicherheitsvorkehrungen mit menschlichem Einfluss werden mit verschiedenen Kriterien einander gegenübergestellt werden können. Das heißt, es ist beabsichtigt, eine Lösung für die Anwendungsfälle 1 und 2 zu bieten, und ein Fundament für eine spätere Lösung der Fragestellung des Anwendungsfalls 3 zu entwickeln.

Die Mensch-Barrieren-Interaktion analysiert die Interaktion von Menschen mit Barrierensystemen, also den strukturellen Ausprägungen einer Barriere oder innerhalb einer Barriere. Menschen interagieren strenggenommen nicht mit Barrieren *selbst*. Der Schwerpunkt des Ansatzes *Mensch-Barrieren-Interaktion* liegt auf der Analyse der Interaktion mit Barrierensystemen und der Schritte, durch die die Sicherheitsfunktion einer Barriere umgesetzt wird. Mit anderen Worten, die folgenden Fragen sollen beantwortet werden:

- Durch welche Mensch-Maschine-Interaktion wird die Sicherheitsfunktion einer Barriere erfüllt, bei der ein Mensch einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktion hat?
- Wie zuverlässig ist eine solche Barriere?

Die neue Methodik soll die Analyse von Barrieren gezielt um Kriterien für das Wechselspiel zwischen der Barriere und dem menschlichen Bediener erweitern. Die Qualität der Interaktion zwischen Menschen und Barrierensystemen soll bewertet werden. Mit anderen Worten, die Fehleranfälligkeit der Interaktion einer Barriere und einem Menschen wird untersucht. Dabei wird über die eindimensionale Betrachtung mit einem Kriterium *Abhängigkeit von menschlichen Handlungen* oder die Fokussierung auf absichtliche Fehler beim Entfernen von Barrieren deutlich hinausgegangen.

Die Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion eignet sich damit zur Verfolgung zweier Ziele, von denen das zweite in dieser Arbeit im Vordergrund steht.

- Erweiterung der Bewertung von Barrierenqualität und -leistung um Kriterien der Interaktion von Menschen mit Barrieren

- Erzielung von semi-quantitativen Aussagen zur Fehleranfälligkeit von Interaktionen von Menschen mit Barrieren, Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit

Die Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion basiert auf der Annahme, dass im Arbeitssystem so gut wie keine physischen Arbeiten zu verrichten sind, sondern die Arbeit durch mentale Tätigkeiten dominiert. Entsprechend sind keine Werkzeuge zu finden, sondern in der Regel Hebel oder Instrumente und Bildschirmoberflächen, an denen Einstellungen vorgenommen werden können. Diese Eigenschaften treffen für die Arbeitsplätze von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern zu.

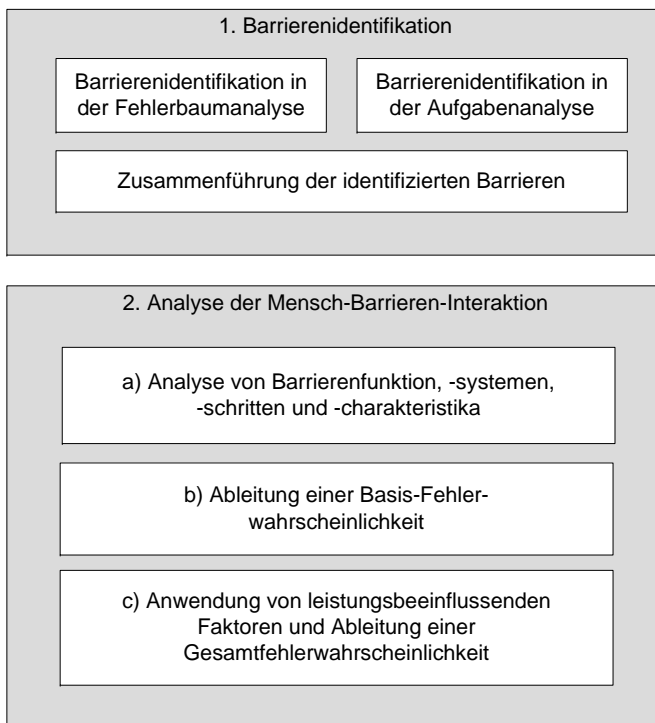


Abbildung 5.4: Vorgehensweise der entwickelten Methodik

Die Methodik beginnt mit dem Auftreten einer menschlichen Bedienhandlung an einem Punkt in der Sicherheitsbetrachtung. Erste Komponente ist eine Identifikation der Barrieren für diese Situation. Diese Identifikation geschieht zum einen im Feh-

lerbaum und zum anderen in der Aufgabenstruktur des menschlichen Bedieners. Als zweite Komponente schließt sich die Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion für das jeweilige Szenario an. Die Erkenntnisse der Aufgabenanalyse, die für die Barrierenidentifikation nötig ist, sind auch hilfreich für die Bestimmung der aktuellen Arbeitsbelastung als Teil der leistungsbeeinflussenden Faktoren. Die Vorgehensweise gliedert sich dabei wie in Abbildung 5.4 dargestellt.

Das zu Beginn der Arbeit gesteckte Ziel lautete, eine sorgfältige Analysebasis zu schaffen und eine Vorgehensweise für eine qualitativ-vergleichende Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit zu entwickeln. Dieses Ziel wird mit der Beschreibung der Komponenten 1 sowie 2 a) im verbleibenden Teil dieser Arbeit verfolgt und erreicht werden. Mit den Schritten wird die Bearbeitung von Fragestellungen aus den Anwendungsfällen 1 und 2 möglich. Die Beschreibung von Mensch-Maschine-Systemen und der Vergleich ihrer Zuverlässigkeit muss dafür entwickelt werden. Eine solide, qualitative Analyse ist auch zentraler Bestandteil eines HRA-Verfahrens und essentiell für eventuelle, spätere Erweiterungen zur Erzielung quantitativer Aussagen.

Die Schaffung einer methodischen Analytik zur quantitativen Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit würde die Komponenten 1 und 2 komplett umfassen. Diese Entwicklung ist für den Rahmen dieser Arbeit zu umfangreich, da die Grundlagen vor dem Beginn der Arbeit zu bruchstückhaft sind. Grund für die Limitierung auf qualitative Aussagen ist, dass eine aufwändige Validierung der zugrunde liegenden Hypothesen nötig wird, sobald die qualitativen Ergebnisse mit Zahlenwerten hinterlegt werden. Mit anderen Worten, der Bedarf des zuvor beschriebenen Anwendungsfalls 3 kann in dieser Arbeit nicht abschließend beantwortet werden. Mit der Methode wird allerdings ein Weg aufgezeigt, mit der die spätere, quantitative Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit gelingen wird: die Hinterlegung der aufgestellten Bewertungs-/ Komplexitätskriterien mit quantitativen Skalen. Eine solche Validierung sowie die Entwicklung der Komponenten 2 b) und 2 c) muss künftigen Arbeiten vorbehalten bleiben. Wenn die qualitativen Aussagen über eine semi-quantitative zu einer quantitativen Bewertung weitergeführt werden, stehen für eine Validierung der quantitativen Angaben eine große Zahl möglicher Ansätze zur Verfügung. Darunter sind Experteninterviews, Ereignisdatenanalysen und Simulatorstudien zu nennen. Zur Anwendung der leistungsbeeinflussenden Faktoren (Schritt 2 c)) können eventuell Anleihen bei einzelnen, existierenden HRA-Verfahren genommen werden. Nach Beschreibung der qualitativen Analysen werden in Kapitel 7.1 die Wege für eine entsprechende Fortsetzung der Forschungsarbeiten erläutert.

Die systematische Beschreibung von Mensch-Maschine-Systemen mit sicherheitskritischen Aufgaben zum einen und der Vergleich der Zuverlässigkeit der Interaktionen zum anderen müssen durch die Mensch-Barrieren-Interaktion gelöst werden. In dieser Arbeit werden die Komponenten 1) und 2 a) der Methode (Abbildung 5.4) beschrieben. Die Vorgehensweise wird in den folgenden Kapiteln erläutert:

- Barrierenidentifizierung → Kapitel 5.3 im Anschluss
- Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion → Kapitel 6

5.3 Identifikation der Barrieren

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Identifizierung von Barrieren erläutert. Bei der Benennung der Barrieren und ihrer Barrierensysteme handelt es sich um den grundlegenden Schritt vor der Bewertung der Mensch-Barrieren-Interaktion. Es wird die erste Komponente aus Abbildung 5.4 erläutert. Zunächst werden existierende Verfahren bzw. Ansätze im Eisenbahnsystem beschrieben. Dadurch wird hervorgehoben, dass der Gedanke, Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren zu begreifen, bereits bekannt ist. Im Anschluss wird ein neues Verfahren zur Barrierenidentifikation vorgeschlagen, das die Vorteile verschiedener Verfahren verknüpft. Bemerkungen zum Verständnis einiger Besonderheiten von bestimmten Barrierensystemen beenden diesen Abschnitt.

Aus der Literatur sind mehrere Ansätze bekannt, bei denen oder mittels derer Barrieren im Eisenbahnsystem benannt werden. Bei dem Forschungsprojekt ROSA (Rail Optimization Safety Analysis) handelt es sich um eine deutsch-französische Zusammenarbeit von Forschungsinstituten und Eisenbahnunternehmen, die parallel zu den Standardisierungsbemühungen der europäischen Eisenbahnagentur die Sicherheitsbetrachtungen international zusammenzuführen versucht [28], [125], [155]. Hierfür wird das Konzept der Barrieren gewählt. Sicherheitsvorkehrungen sollen außerdem mit einem *Barrier Quantification Model* bewertet werden. Barrieren tauchen zwar im ganzen Bow-Tie-Modell auf, werden jedoch im Rahmen von ROSA nur im Ereignisbaum bewertet. Mit einem nicht weiter erläuterten Verfahren wurden generische Barrieren im Eisenbahnsystem identifiziert, die im einzelnen Anwendungsfall durch verschiedene Ausprägungen umgesetzt sein können. Von besonderem Interesse sind für die vorliegenden Betrachtungen insbesondere die Barrieren mit einem Anteil menschlicher Leistung. Prinzipiell können in vielen von ROSA identifizierten, generischen Barrieren menschliche Handlungen vorkommen, hierzu konnten jedoch

keine Aussagen gefunden werden. In der Gruppe *Human Attention* werden eine Reihe von Phänomenen beschrieben, in denen menschliche Aufmerksamkeit zur Gefahrenabwehr beiträgt. Hier sind auch Beispiele zu finden, wo die von Menschen übernommene Funktion nicht geplant eingesetzt werden kann und wobei es sich dann strenggenommen nicht um eine Barriere nach der wissenschaftlichen Definition von SKLET handelt. Grundsätzlich muss jedoch festgehalten werden, dass durch die Arbeiten im Projekt ROSA wesentliche, technische Barrieren identifiziert wurden und entscheidende Grundlagen gelegt werden konnten. Für Barrieren, bei denen Menschen einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktion besitzen, ist jedoch eine noch differenziertere Betrachtung empfehlenswert.

An anderer Stelle wird vorgeschlagen, die Identifikation von Sicherheitsschichten im Eisenbahnverkehr durch *Why-Because-Analysen* zu unterstützen [156]. In einer daran anknüpfenden Publikation wird die Identifikation von Barrieren mittels Fehlerbaumanalyse am Beispiel eines Bahnübergangs gezeigt. Die vorgestellte Methode zur Identifikation von Barrieren bietet eine logische Vorgehensweise und soll unstrukturiertes Scannen ersetzen [158]. In diesem Verfahren werden die Barrieren mithilfe eines bereits erstellten Fehlerbaums identifiziert. Es ist von oben, vom Hauptelement des Baums aus, nach unten vorzugehen. Es wird davon ausgegangen, dass sich hinter bzw. unter mit UND verknüpften Ästen unabhängig voneinander wirkende Systemelemente verbergen. Unabhängige Elemente werden als eigenständige Barrieren aufgefasst. Es sind daher von oben nach unten jeweils die ersten ODER-Verknüpfungen zu suchen. Nun sind zwei Fälle zu unterscheiden. Handelt es sich bei den Elementen unter dieser ODER-Verknüpfung um eine Reihenschaltung verschiedener Komponenten, kann die Barriere direkt aus dem Element über der ODER-Verknüpfung abgeleitet werden. Denn in diesem Fall führt der Ausfall eines der darunter liegenden Elemente direkt zum Ausfall der Barriere. Im zweiten Fall wird der Name der Barriere nicht im Element über der ODER-Verknüpfung erwähnt, sondern in allen Elementen unter der Verknüpfung. In der Regel handelt es sich bei diesem Fall um die fehlende Aktivierung, falsche Funktion oder fälschliche Deaktivierung derselben Systemkomponente. In einigen Fällen können die identifizierten Barrieren durch weitere Suche in unteren Verzweigungen des Fehlerbaums in weitere Barrieren zerlegt werden. Die Methode wird anhand des Beispiels Bahnübergang gezeigt und in Grundzügen validiert. Sie liefert eine strukturierte Anleitung zur Identifikation von Barrieren und kann das unstrukturierte Scannen ergänzen. Die Methode kann damit auch als Teil des Analyseverfahrens der Mensch-Barrieren-Interaktion genutzt werden.

Auch in einer Studie im Auftrag des internationalen Eisenbahnverbands UIC zum grenzüberschreitenden Verkehr in Europa wurden sicherheitskritische Funktionen (Barrieren) identifiziert bzw. vielmehr zunächst gruppiert [92]. Insgesamt ist festzuhalten, dass der Ansatz und die Denkweise der Barrieren im Eisenbahnsystem bereits bekannt sind. Die Idee der Barrieren eignet sich daher nicht nur, wie oben gezeigt, für einen neuen Ansatz zur Bewertung der Fehleranfälligkeit bestimmter Mensch-Maschine-Interaktionen, sondern auch für eine praktische Anwendung einer solchen Methodik im Eisenbahnverkehr. Es ist jedoch genauso festzuhalten, dass weder im Eisenbahnverkehr noch im übergeordneten Forschungskontext Barrieren mit menschlichen Einflüssen bereits detailliert analysiert worden sind.

An dieser Stelle wird ein kombiniertes Verfahren zur Barrierenidentifikation vorgeschlagen. Dafür soll eine Kombination aus Fehlerbaum- und Aufgabenanalyse eingesetzt werden. Die Verknüpfung soll die Nachteile der einzelnen Methoden ausgleichen. Eine solche Kombination wurde auch bereits zur Unterstützung von Sicherheitsanalysen vorgeschlagen, wird jedoch dort zunächst nur für eine retrospektive Anwendung für Unfallanalysen empfohlen [39].

Der ausschließliche Einsatz einer Fehlerbaumanalyse (FTA) begünstigt eine sehr *szenariobasierte* Identifikation von Sicherheitsmechanismen. Es besteht das Risiko, menschliche Bedienungen wie die Funktionen technischer Systeme zu behandeln. Auf den Einsatz der Fehlerbaumanalyse kann aufgrund der großen Verbreitung in der Eisenbahnsicherungstechnik nicht verzichtet werden, er soll jedoch um die Aufgabenanalyse ergänzt werden. Für die Analyse der menschlichen Tätigkeiten wird die *Hierarchical Task Analysis* (hierarchische Aufgabenanalyse; HTA) vorgeschlagen, die die Aufgaben in einer Baumstruktur anordnet (z.B. siehe [5]). Sie ist leicht verständlich und bietet eine dem Praktiker vertraute, übersichtliche Struktur. Die Analyse bietet eine *aufgabenorientierte* Perspektive, die aus Sicht der Human factors unerlässlich ist. Die Anwendung ermöglicht einen Blick auf die Tätigkeiten, die der menschliche Bediener in der Situation grundsätzlich zu erledigen hat. Es ist also neben der Aufgabe, die nun im vom Fehlerbaum vorgegebenen Szenario fehlerhaft durchgeführt oder ausgelassen wird, auch die Analyse der parallelen Tätigkeiten möglich. Gleichzeitig wird auch gegenüber der ausschließlichen Betrachtung von Auslassungsfehlern die Einbeziehung von Ausführungsfehlern gestärkt. Die Durchführung einer Aufgabenanalyse allein würde wiederum die technischen Barrieren außen vorlassen, daher ist die gemeinsame Durchführung empfohlen.

Die Vorgehensweise innerhalb dieser Komponente der Methode gliedert sich in drei Schritte:

- Barrierenidentifikation in der FTA
- Barrierenidentifikation in der HTA
- Zusammenführung der identifizierten Barrieren

Die drei Schritte werden im Folgenden erläutert. Die Vorgehensweise wird später am Ende des folgenden Kapitels auch anhand eines Beispiels gezeigt.

Für den ersten Schritt, die Identifikation von Barrieren aus dem Fehlerbaum, kann das bisherige Scannen eingesetzt werden oder die strukturierte Methode nach [158], die zuvor beschrieben wurde. Da das Verständnis von Barrieren im Eisenbahnsystem bereits bekannt ist, kann hier von einer Vorgehensweise mit geringem Schwierigkeitsgrad ausgegangen werden. Im Hauptinteresse stehen die Barrieren, bei denen ein menschliches Mitwirken an der Sicherheitsfunktion gegeben ist, oder bei denen die Sicherheitsfunktion nur bei einer bestimmten Handlung oder Unterlassung umgesetzt wird.

Im zweiten Schritt werden die Barrieren aus der Aufgabenanalyse heraus identifiziert. Bei der HTA wird die Haupttätigkeit als Kopf des Baumes an den Beginn gesetzt. Die Haupttätigkeit muss so global definiert werden, dass sie möglichst alle Szenarien umfasst, in denen die im Fehlerbaum fälschlich ausgeführte Handlung vorkommt. Die einzelnen Teilaufgaben werden in der HTA in einer Baumstruktur nach unten aufgetragen. Dabei kann es in manchen Fällen komplex sein, die Anordnung der Aufgaben auf einer Ebene vorzunehmen. Es ist dann entsprechend zu markieren, ob Aufgaben parallel (gleichzeitig) oder sequentiell (nacheinander) durchzuführen sind.

Zur Identifikation von Barrieren müssen die Tätigkeiten in *Tätigkeiten mit Sicherheitsfunktion* und *Tätigkeiten mit Leistungsfunktion* eingeteilt werden. Eine Tätigkeit besitzt genau dann eine Sicherheitsfunktion, wenn das Ausbleiben oder eine fehlerhafte Ausführung dieser Handlung eine Gefährdung oder Risiken nach sich zieht oder die Tätigkeit Teil einer anderen Funktion mit Sicherheitsrelevanz ist.

Die Zusammenfassung der Tätigkeiten mit Sicherheitsfunktionen zu Barrieren erfolgt mit folgender Strategie: Instrumente und Signale, die zu beachten sind, repräsentieren in der Regel *Barrierensysteme*. Auszuführende Handlungen stehen für umzusetzende *Barrierenfunktionen*. Barrierensysteme und -funktionen können schließlich zu einer Barriere zusammengefasst werden. Es können jedoch auch Bar-

rieren identifiziert werden, wenn einer Tätigkeit mit Sicherheitsfunktion in der HTA lediglich eine Barrierenfunktion und kein Barrierensystem zugeordnet werden kann. Letztendlich identifiziert man auf diese Weise symbolische und immaterielle Barrieren. Bei dem Beispiel der Pfeiftafel vor einem Bahnübergang korrespondiert die Tätigkeit *Erkennen der Pfeiftafel* mit dem Barrierensystem (die Tafel), die Tätigkeit *Betätigen des Horns* entspricht der Ausführung der Barrierenfunktion.

Auch die Tätigkeiten mit Leistungsfunktion müssen hinsichtlich der Identifikation von Barrieren durchgegangen werden. Die entscheidende Fragestellung lautet dabei, ob durch die Ausführung der Tätigkeit eine bereits aktive Sicherheitsvorkehrung außer Kraft gesetzt wird (z.B. Deaktivierung eines Sicherheitsmechanismus) oder eine Sicherheitsvorkehrung durch eine bestimmte, evtl. fehlerhafte Bedienung oder Unterlassung initiiert wird (z.B. Schutz nach einer Fehleingabe von Daten). Bei beiden Gruppen handelt es sich um funktionale Barrieren, bei der die Sicherheitsfunktion beim technischen System liegt, der Mensch jedoch eine Möglichkeit des Einwirkens besitzt.

Im dritten und letzten Schritt werden die Mengen der identifizierten Barrieren zusammengeführt. Dabei sind Dopplungen zu entfernen. Vorteilhaft ist, dass im mehrteiligen Identifikationsverfahren zwei verschiedene Herangehensweisen zu einer ganzheitlichen Betrachtungsperspektive führen. Über die aus dem Fehlerbaum stammenden Barrieren hinaus können weitere Barrieren identifiziert werden, die im Szenario der Tätigkeit ebenso wirksam sind. Für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit sind sämtliche Mensch-Maschine-Interaktionen und sämtliche Barrieren von Interesse. Es handelt sich also um eine wertvolle Ergänzung der Analyse zur Bewertung einer menschlichen Zuverlässigkeit in einem bestimmten Szenario und um eine notwendige Aufbereitung der in der Situation auftretenden und möglichen Interaktionen. In der Zusammenstellung der Barrieren am Ende der Identifikation sollte noch einmal überprüft werden, dass Sicherheitsfunktionen *Barrieren* zugeordnet sind und nicht einzelnen Barrierensystemen. Spezielle Eigenschaften mancher Barrieren werden im Folgenden erläutert.

Barrierensysteme sind definiert als die organisatorische und/oder physische Struktur, ohne die die Barrierenfunktion nicht erreicht werden könnte. Es ist dabei bereits bekannt, dass eine einzelne Barriere aus mehreren Barrierensystemen bestehen kann [84]. Teilweise sind sogar mehrere Barrierensysteme für das einwandfreie Funktionieren einer Barriere unbedingt erforderlich. Genauso ist bekannt, dass gegen eine Gefährdung durchaus mehrere Barrieren eingesetzt werden können, sie bilden dann *Barrierenkomplexe*. Es ist also grundsätzlich zu unterscheiden,

ob *mehrere Barrieren* oder *mehrere Barrierensysteme innerhalb einer Barriere* betrachtet werden.

Bei symbolischen Barrierensystemen gibt es eine weitere Besonderheit, auf die hingewiesen werden muss. Es gibt *Barrierensystemträger*, die in der Lage sind, verschiedene Zustände einzunehmen. Dabei existieren erstens Barrierensystemträger, bei denen das Barriersystem wirksam oder unwirksam geschaltet werden kann. Es gibt zweitens Barrierensystemträger, die als verschiedene Barrierensysteme fungieren können. Beispiel: Ein streckenseitiges Signal ist eine typische symbolische Barriere im Eisenbahnverkehr. Strenggenommen ist dabei von einem Barriersystem zu sprechen, da manche Signale auch erst zusammen mit anderen Barriersystemen, z.B. dem Tacho, ihre Funktion erfüllen. Zeigt das Signal *Halt*, wirkt es als Barriere. Ein *Fahrt* zeigendes Signal ist eine Barriere, die *unwirksam geschaltet* ist. Sie unterstützt mit ihrem Fahrtbegriff die Weiterfahrt, also eine Leistungsfunktion. Ein *Langsamfahrt erwarten* zeigendes Vorsignal zeigt ein anderes Barriersystem als ein *Halt erwarten* zeigendes Vorsignal. Das Vorsignal ist also ein Barrierensystemträger. Die Formulierung *unwirksam geschaltet* ist dabei mit Bedacht gewählt, denn die Barrierenfunktion ist in diesem Moment bewusst nicht gewünscht. Sie ist also nicht durch einen technischen Defekt ausgefallen. Sie ist auch nicht *deaktiviert* worden, diese Begrifflichkeit wird später noch für eine Abschaltung durch den Operateur im Moment der Bedienung eingeführt.

6 Entwicklung der Methode zur Bewertung der Mensch-Barrieren-Interaktion

In diesem Kapitel wird der Kern der Mensch-Barrieren-Interaktion beschrieben. Es handelt sich um die wesentliche Komponente der Methodik zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit. Die Ausführungen stützen sich auf die Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion aus Kapitel 4 sowie auf die Identifizierung von Barrieren aus Kapitel 5. Es wird das Handwerkszeug entwickelt, das für die Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion nötig ist. Mit anderen Worten, in diesem Kapitel wird die Komponente 2a) der Methode und aus Abbildung 5.4 *Analyse von Barrierenfunktion, -systemen, -schritten und -charakteristika* erläutert.

Zur Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion werden die bisherigen Begriffe Barrierensystem und Barrierenfunktion präzisiert bzw. in ihre Einzelbestandteile zerlegt. Die Einführung hierzu liefert das erste Unterkapitel. Im Anschluss wird das Konzept der Sicherheitsbarrieren mit der Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion verknüpft. Die verschiedenen Typen und Varianten von Barrierensystemen werden eingeführt und erläutert. Die anschließenden Unterkapitel (Abschnitte 6.3 und 6.4) analysieren Barrieren verschiedener Ausprägungen auf ihre Komplexität und liefern damit die Grundlage für die Bewertung der Fehleranfälligkeit. Zur Reduktion des Untersuchungsumfangs werden in Kapitel 6.5 durch einen Abgleich der Mensch-Barrieren-Interaktion mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler aus Kapitel 4.1 die wichtigsten Fehler herausgearbeitet. Im vorletzten Abschnitt dieses Kapitels werden die Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten, qualitativen Methodik zur Barrierenidentifikation und -analyse erläutert, bevor das abschließende Unterkapitel die Vorgehensweise anhand eines Beispiels demonstriert.

6.1 Dekomposition der Barrierenfunktion

Bislang existierte zur Beschreibung von Barrieren lediglich die Unterscheidung zwischen Barrierensystem und Barrierenfunktion. Dabei war die Barrierenfunktion

als die Art und Weise definiert, durch die die Barriere ihren Zweck erfüllt. Das Barrierensystem hingegen wird als die organisationelle und/oder physische Struktur verstanden, ohne die die Barrierenfunktion nicht erreicht werden könnte. Zur weiteren Analyse des menschlichen Umgangs mit Barrieren muss die Barrierenfunktion in mehrere Teilfunktionen zerlegt werden.

Die Dekomposition erfolgt in drei nacheinander stattfindenden Ablaufschritten. Sie werden im Folgenden definiert und erläutert.

- **Barriereninitiierung / *Barrier initiation* (BI)**

Barriereninitiierung repräsentiert die einleitende Wirkung einer Situation oder eines Barrierensystems oder das Zusammenspiel von barriersystemspezifischen Vorgängen, die in einem Impuls resultieren, der die Barrierenverarbeitung anstößt. Es handelt sich um eine Informationsaufnahme und/oder -verarbeitung durch diejenige Komponente im Mensch-Maschine-System, die bei dieser Barriere die Barrierenverarbeitung ausführt.

Ist der menschliche Bediener letztendlich für die Barrierenverarbeitung und -ausführung verantwortlich, so ist am Ende der Barriereninitiierung dem Menschen das Problem bewusst, z.B. *der Zug fährt aktuell eine zu hohe Geschwindigkeit*.

- **Barrierenverarbeitung / *Barrier processing* (BP)**

Die Barrierenverarbeitung besteht in der Ableitung einer durchzuführenden Aktion aus dem Impuls der Barriereninitiierung.

Ist der menschliche Bediener verantwortlich für die Barrierenverarbeitung, so handelt es sich bei diesem Schritt i.d.R. um die Ableitung eines Handlungsziels aus dem Problemverständnis, das vor Beginn dieses Schrittes vorliegt.

- **Barrierenausführung / *Barrier execution* (BE)**

Die Barrierenausführung repräsentiert die Umsetzung der durch die Barrierenverarbeitung abgeleiteten Aktion. Erst mit diesem Schritt wird die Barrierenfunktion ausgeübt.

Es wäre zusätzlich noch ein vorgelagerter Ablaufschritt denkbar, eine *Barrierenvorbedingung*. Es würde sich um eine notwendige, meist technische Voraussetzung eines Barrierensystems handeln, ohne die die Impulsgebung der Barriereninitiierung nicht stattfinden kann. Da es sich also um eine technische Gegebenheit handelt, die vom menschlichen Bediener in der Situation nicht veränderbar ist, wird die Barrie-

renvorbedingung nicht weiter betrachtet. Sie ist für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit weniger bedeutsam.

Die Ablaufschritte Initiierung, Verarbeitung und Ausführung von Barrieren sollen an dieser Stelle sowohl mit dem klassischen Modell der menschlichen Informationsverarbeitung *Wahrnehmen* → *Entscheiden* → *Handeln* als auch mit dem modernen Modell (Abbildung 4.5 auf Seite 83) verglichen werden. Die Ablaufschritte einer menschlichen Handlung sind in Abbildung 6.1 von links nach rechts dargestellt.

Die oberste Zeile bildet das klassische Modell der Informationsverarbeitung *Wahrnehmen* → *Entscheiden* → *Handeln* ab. Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, weist diese rein sequentielle Modellierung Schwächen auf. Auf die fehlende Trennung zwischen Problemerkennung und Handlungsableitung weist die Zeile 2.1 der Abbildung hin. Eine weitere Ablaufmöglichkeit, bei der die Wahrnehmung von Menschen geplant sein muss (Zeile 2.2), lässt sich mit dem klassischen Modell nicht präzise abbilden. Die Einteilung der Barrierenschritte in Initiierung, Verarbeitung und Ausführung distanziert sich also von der Dreiteilung des klassischen Modells. In der Initiierung sind die Planung einer Wahrnehmung, die Wahrnehmung und die Problemerkennung enthalten. Das klassischerweise in einem Prozess abgebildete *Entscheiden* ist hier in Problemerkennung und Handlungsableitung aufgeteilt. Es ergibt sich damit eine logische Trennung zweier Prozesse der kognitiven Verarbeitung. Bestandteil des neuen und hier verwendeten Ansatzes ist das Modell der kognitiven Informationsverarbeitungsschleife. Sie überwindet zum einen eine rein sequentielle Modellierung durch Einbeziehung einer Schleife und ermöglicht zum anderen die Abbildung von Aufgabenprozessen, die nicht erst mit der Wahrnehmung beginnen. Die beiden beispielhaften Abläufe sind in den letzten beiden Zeilen von Abbildung 6.1 zu sehen (Zeilen 4.1 und 4.2). Hier sind die Schritte der Informationsverarbeitung symbolisch in kleinen und vereinfachten Piktogrammen nach dem Diagramm aus Abbildung 4.5 dargestellt. Die Erläuterung ergibt sich dabei aus den Zeilen 2.1 und 2.2. Der geschlossene Pfeilkreislauf stellt den einmaligen Durchlauf durch die kognitive Verarbeitungsschleife dar (er beginnt und endet beim rautenförmig dargestellten Entscheidungsmodul). In aller Regel wird die kognitive Verarbeitungsschleife bei einer Barriere mit menschlicher Handlung zwei Mal durchlaufen. Ein weiterer Vorteil gegenüber einer klassischen Modellierung ist in der Fähigkeit dieses Ansatzes zu sehen, mehrfache Wahrnehmungen nacheinander abzubilden. Dies lässt sich jedoch in dem schematischen Vergleich in Abbildung 6.1 nicht darstellen und wird später beschrieben.

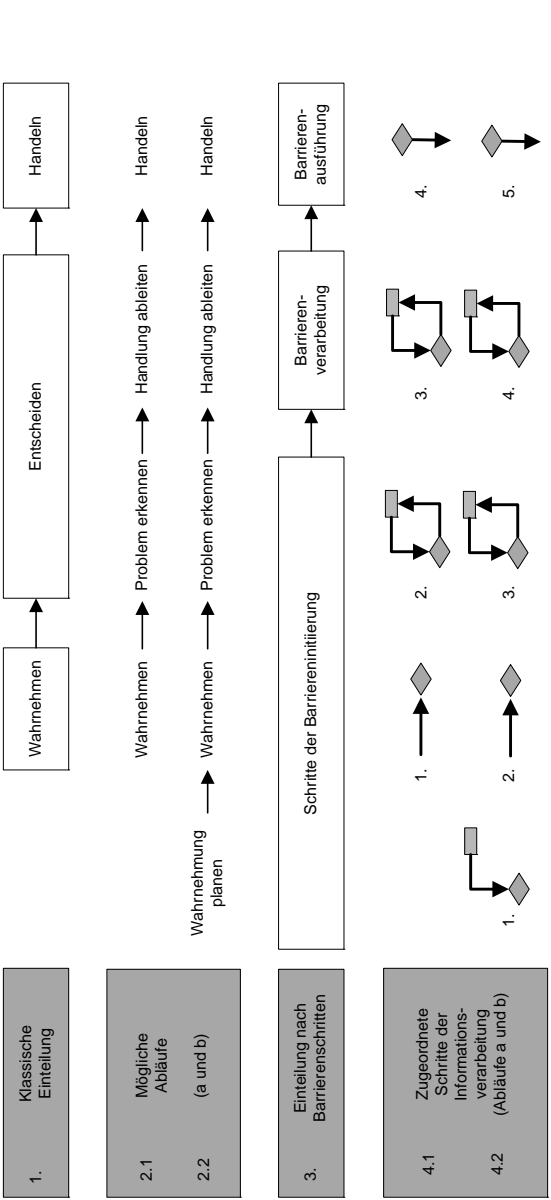


Abbildung 6.1: Ablaufschritte der Barrierenfunktion und Zuordnung zur klassischen und neuen Einteilung menschlicher Informationsverarbeitung

Es wird deutlich, dass die Dreiteilung der Barrierenfunktion in Initiierung, Verarbeitung und Ausführung – verknüpft mit dem modernen Modell der Informationsverarbeitung – ein wesentlich breiteres Betrachtungsspektrum als klassische Modelle ermöglicht. Verknüpft man nun die Dekomposition der Barrierenfunktion mit den Erkenntnissen zu Barrierensystemen, ergibt sich eine zentrale Zerteilung der Wirkungsweise von Barrieren, in der die menschliche Verhaltensweise besser analysiert werden kann.

6.2 Entwicklung der Mensch-Barrieren-Interaktion

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion mit dem Barrierenkonzept und den Erkenntnissen aus dem vorherigen Abschnitt dieses Kapitels zusammengebracht. Ziel ist dabei eine Aussage über die Art und Weise, wie bei verschiedenen Barrierentypen die Sicherheitsfunktion der Barriere erbracht wird. Mit anderen Worten, es soll untersucht werden, wie Mensch und Maschine in der Barriere miteinander interagieren.

Eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Barrierentypen ergibt sich aus der bekannten Klassifikation in funktionale, symbolische und immaterielle Barrieren bzw. Barrierensysteme. Bei funktionalen Barrieren auf der einen Seite übernehmen technische Systeme die Barrierenfunktion, bei symbolischen und immateriellen Barrieren auf der anderen Seite sind menschliche Bediener für die Ausübung der Barrierenfunktion verantwortlich. Physische Barrierensysteme werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da ihre Wirksamkeit nicht von menschlichen Handlungen abhängt.

Es sind im Sinne der Mensch-Maschine-Interaktion drei grundsätzliche Typen von Barrieren zu unterscheiden. Sie sind in Abbildung 6.2 zu sehen. Abgebildet sind Mensch-Maschine-Systeme inklusive ihrer Umgebung. Kreisförmige Pfeile symbolisieren die Ausführung des Schritts innerhalb des jeweiligen Systemelements, Pfeile zwischen Mensch und Maschine repräsentieren eine Bedienung oder einen Informationsfluss. Dargestellt sind zunächst nur die Barrierenverarbeitung (BP) und die Barrierenausführung (BE), also die Schritte 2 und 3 des Barrierenablaufs.

Bei den Typen A und B ist der menschliche Bediener für die Barrierenverarbeitung und -ausführung verantwortlich. Die Barrierenfunktion wird bei Typ A durch eine menschliche Handlung an einem technischen System realisiert. Bei Typ B ist die-

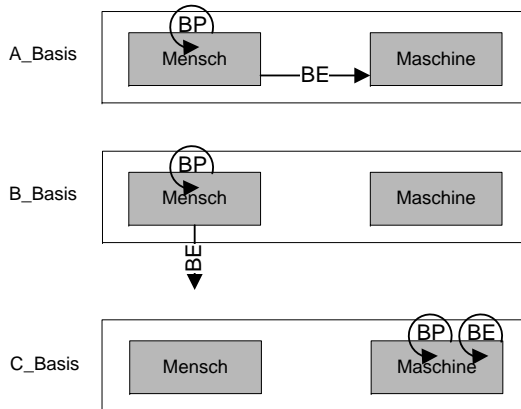


Abbildung 6.2: Die drei grundsätzlichen Typen der Mensch-Barrieren-Interaktion

se Barrierenfunktion durch eine Ausgabe des Menschen an ein Objekt außerhalb des Mensch-Maschine-Systems charakterisiert, die Barrierenausführung ist daher nach außen gerichtet. Bei den Typen A und B handelt es sich um symbolische oder immaterielle Barrieren, die genaue Unterscheidung hängt von der Art der Barriereninitiierung (BI) bzw. weiteren Faktoren ab. Bei Typ C führt das technische System (die Maschine) die Barrierenverarbeitung und die Barrierenausführung durch. Hierbei handelt es sich um funktionale Barrieren. Bei der Beschreibung der verschiedenen Barrieren ist jeweils das beabsichtigte Verhalten der Barriere dargestellt. Mit anderen Worten, abgebildet ist das Sollverhalten, bei der die Barrierenfunktion ohne Abweichungen umgesetzt wird. Betrachtungen zu möglichen Fehlern werden später angeschlossen.

Die Klassifikation von Barrieren soll mit *Varianten* innerhalb der *Typen* A bis C noch weiter herunter gebrochen werden. Eine Barriere ist durch den Typ A, B oder C eindeutig zu klassifizieren, siehe Abbildung 6.2. Eine Barriere kann jedoch mehrere Barrierensysteme enthalten. Ein Barrierensystem muss dabei nicht als System körperlich vorhanden sein, sondern kann funktional, symbolisch oder immateriell sein. Die einzelnen Barrierensysteme spielen in erster Linie bei der Barriereninitiierung eine Rolle, können jedoch auch in einzelnen Fällen auch bei der Barrierenausführung von Bedeutung sein.

Die im Anschluss vorgestellten Varianten A1 bis A4, B1 bis B4 sowie C1 bis C6 stellen keine vollständigen Barrieren, sondern zunächst Barrierensysteme dar. Durch

Kombination der Informationen zu Barriersystemen können die Merkmale einer gesamten Barriere zusammengetragen werden. Für eine Barriere, die aus genau einem Barriersystem besteht, ist eine Darstellung wie eine Folie eines Tageslichtprojektors über die Basis zu legen. Durch die Kombination der Elemente der Basisfolie und der barriersystemspezifischen Folie ergibt sich eine vollständige Darstellung der Mensch-Barrieren-Interaktion. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise für einen einmaligen Kombinationsvorgang ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Bei Barrieren, die aus mehreren Barriersystemen bestehen, sind mehrere der barriersystemspezifischen Folien über die Basisfolie zu legen.

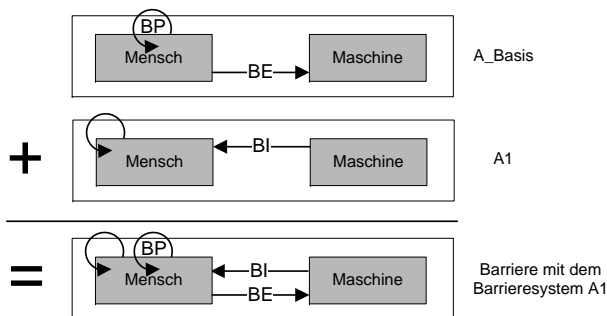


Abbildung 6.3: Zusammensetzen der Mensch-Barrieren-Interaktion einer Barriere durch Kombination zweier Folien

Die Barrierentypen A und B werden als erstes beschrieben. Bei Typ C treten Fälle auf, für deren Erläuterung die Kenntnis der Typen A und B hilfreich ist. Die Varianten von Barriersystemen sind für die Typen A und B in Abbildung 6.4 dargestellt. Abgebildet sind wieder die Mensch-Maschine-Systeme, inklusive ihrer Umgebung. Durch Übereinanderlegen von einzelnen oder mehrerer Folien über die Basisfolie (Abbildung 6.2) ergeben sich vollständige Diagramme der Mensch-Barrieren-Interaktion.

Die einzelnen Diagramme beschreiben mit ihren Pfeilen jeweils Informationsflüsse zwischen den verschiedenen Systemelementen. Ausgänge eines Elements werden jedoch nun nicht mehr stets rechts, Eingänge nicht mehr stets auf der linken Seite angeordnet. Eine solche Darstellung wäre bei Informationsflüssen vom Menschen an die Umgebung oder von der Umgebung direkt an das technische System sehr umständlich. Gepunktete Pfeile bedeuten, dass es sich hier um mögliche Informationswege handelt, die auftreten können, jedoch nicht müssen. Es wäre also beispielsweise auch

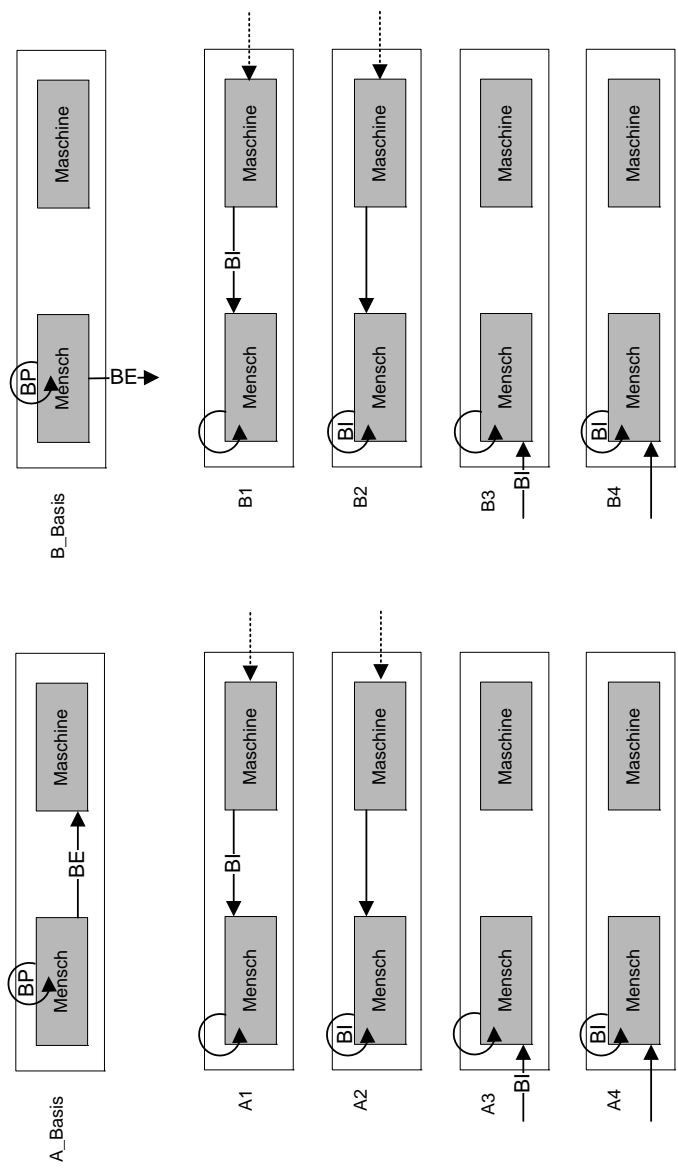


Abbildung 6.4: Barrierensysteme-Varianten A1 bis A4 und B1 bis B4 der Mensch-Barrieren-Interaktion

Legende:

BI	Barriereninitiiierung
BP	Barrierenverarbeitung
BE	Barrierenausführung
Pfeil	Informationsfluss oder Aktion
gepunkteter Pfeil	möglicher Informationsfluss
kreisförmiger Pfeil	Abwicklung des Schritts innerhalb des Systemelements (Mensch oder Maschine)

Abbildung 6.5: Legende zur vorherigen Abbildung (Varianten A1 bis B4 der Mensch-Barrieren-Interaktion)

möglich, zwei Variantenausprägungen A1a und A1b zu zeichnen. Zur Reduktion der Komplexität ist aber die Darstellung mit optionalen Pfeilen gewählt worden, zumal diese Informationsflüsse für die Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktionen eine untergeordnete Rolle spielen. Kreisförmige Pfeile stellen wie zuvor einen Durchlauf durch die Schleife der Informationsverarbeitung dar.

Im Folgenden werden die einzelnen Varianten der Barrierensysteme des Typs A beschrieben. Die zugehörigen Beispiele basieren auf der Annahme, dass das jeweils beschriebene Barrierensystem das einzige Barrierensystem der Barriere ist.

- A1: Hier handelt es sich um ein Signal des technischen Systems an den Bediener, durch das der menschliche Bediener direkt zu einer Handlung aufgefordert wird. Hierbei kann es sich beispielsweise um ein visuelles, akustisches oder im Einzelfall auch haptisches Signal handeln, das den Menschen vor etwas warnt oder über einen kritischen Zustand benachrichtigt. Charakteristisch ist ein kurzes Auftreten des Signals oder eine plötzliche Veränderung des Signals (z.B. die Farbe einer Anzeige).

Das Diagramm A1 ist so zu lesen, dass zunächst die initiiierende Informationsübertragung (mit BI gekennzeichnet) erfolgt. Das anschließende Durchlaufen einer Schleife auf Seiten des Menschen gehört noch zur Barriereninitiiierung.

Beispiel zu A1: Eine Pfeiftafel vor einem Bahnübergang

Barriereninitiiierung	Wahrnehmung der Tafel durch den Triebfahrzeugführer und Erkenntnis, dass daraus eine Handlung abzuleiten ist
Barrierenverarbeitung	Ableitung der Handlung <i>Betätigung des Horns</i>
Barrierenausführung	Betätigung des Horns durch den Triebfahrzeugführer

- A2: Bei der Variante A2 handelt es sich um ein Signal des technischen Systems, aus der der Bediener gemeinsam mit der vorherrschenden Situation einen kritischen Zustand (und daraus eine Handlung) ableiten kann. Typisch für diese Variante sind kontinuierliche Anzeigen von Werten. Ein Beispiel ist ein Tacho, der zunächst als eigenständiges Barrierensystem nur eine Geschwindigkeit anzeigt. Er kann dazu beitragen, dass der Mensch (zusammen mit der Kenntnis der Situation oder anderer Signale) ein Problem erkennt. In der Regel handelt es sich dabei um das Über- oder Unterschreiten eines Schwellwertes. In diesem Fall wäre das Problem eine zu hohe Geschwindigkeit und eine abzuleitende Handlung das Einleiten einer Bremsung.

Im Falle des Barrierensystems Variante A2 erfolgt (wie bei A1) eine Informationsübertragung von der Maschine an den Menschen. Der zugehörige Pfeil ist im Diagramm A2 ohne Beschriftung. Der Kern der Initiierung findet durch einen Durchlauf der Verarbeitungsschleife seitens des menschlichen Operators statt (mit BI gekennzeichnet).

- A3: Bei diesen Barrieresystemen erhält der menschliche Bediener ein initiiierendes Signal von außen, also aus der Situation oder aus einem anderen Mensch-Maschine-System. Ähnlich wie beim Typ A1 entsteht direkt aus dem Signal ein Impuls, durch den der menschliche Bediener ein Problem erkennt. Als Barrierensystem fungiert hier entweder die Nachricht selbst oder eine dem menschlichen Bediener bekannte Regel.

Beispiel Nr. 1: Fahrsituation eines Lokführers, der eine akustische Nachricht per Funk von einem Kollegen empfängt, dass aufgrund eines Objekts auf den Gleisen sofort anzuhalten ist. In diesem Fall ist die Nachricht das entscheidende Barrierensystem.

Beispiel Nr. 2: Ein Lokführer, der bei Annäherung an einen Bahnübergang feststellt, dass sich ein Kraftfahrzeug auf den Gleisen befindet. Das Barrierensystem ist in diesem Fall die Regel, in einer solchen Situation unverzüglich eine Gefahrenbremsung einzuleiten.

- A4: Hier handelt es sich um ein Signal von außerhalb des Mensch-Maschine-Systems an den menschlichen Bediener, das ähnlich wie bei A2 nicht direkt initiiierend wirkt. Das Signal stammt wie bei A3 aus der Situation oder von einem anderen Mensch-Maschine-System. Dadurch dass die Initiierung beim menschlichen Bediener liegt, muss hier eine Regel als Barrierensystem dahinter stehen.

Beispiel: Bei allmählich einsetzendem Regen schaltet der Lokführer den Scheibenwischer ein.

- B1 bis B4: Bei diesen Varianten handelt es sich prinzipiell um ähnliche Interaktionen wie bei den Varianten A1 bis A4. Der Unterschied zu A besteht lediglich darin, dass der menschliche Bediener die Durchführung der Sicherheitsfunktion nicht am technischen System vornimmt. Die Barrierenausführung findet stattdessen nach außen gerichtet statt. Als Beispiel aus dem Eisenbahnverkehr kann hier eine Abgabe einer Nachricht an andere Triebfahrzeugführer oder an den Fahrdienstleiter genannt werden, etwa eine Warnung über ein Objekt im Gegengleis. Für die Barriereninitiierung gelten die Ausführungen zu den Typen A1 bis A4 analog.

Abbildung 6.6 zeigt die Varianten der Barrierensysteme der Barrieren von Typ C. Allen Varianten ist gemein, dass die Maschine, also das technische System, die Barrierenverarbeitung und -ausführung übernimmt. Sie unterscheiden sich also nur hinsichtlich der Barriereninitiierung. In der Regel muss beim Typ C nur eine Folie mit der Basisfolie kombiniert werden. Wie zuvor stellen gepunktete Pfeile Informationswege dar, die in der Variante vorkommen können, jedoch nicht müssen.

- C1: Bei dieser Variante erfolgt die Barriereninitiierung durch ein Signal des Menschen an das technische System. Hierbei kann es sich jedoch nicht um die Durchführung einer Sicherheitsfunktion handeln, denn diese Interaktion ist durch Barrieren des Typs A abgedeckt. Mit anderen Worten, dieses Barrierensystem wird durch Fehler bei Ausführung einer Leistungsfunktion initiiert. Beispiel: Der Triebfahrzeugführer gibt zu Beginn seiner Fahrt versehentlich

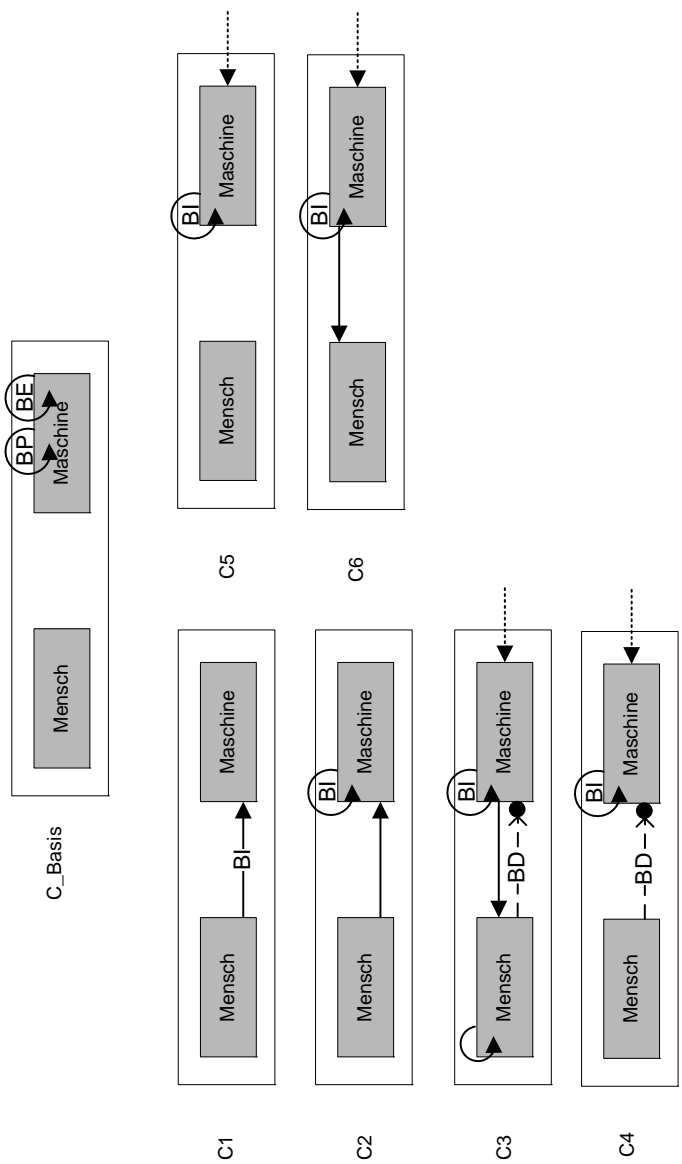


Abbildung 6.6: Barriersysteme-Varianten C1 bis C6 der Mensch-Barrieren-Interaktion

Legende:

BI	Barriereninitiiierung
BP	Barrierenverarbeitung
BE	Barrierenausführung
BD	Barrierendeaktivierung
Pfeil	Informationsfluss oder Aktion
gepunkteter Pfeil	möglicher Informationsfluss
kreisförmiger Pfeil	Abwicklung des Schritts innerhalb des Systemelements (Mensch oder Maschine)
gestrichelter Pfeil	mögliche Handlung des Menschen

Abbildung 6.7: Legende zur vorherigen Abbildung (Varianten C1 bis C6 der Mensch-Barrieren-Interaktion)

Zugdaten ein, die keinen Sinn ergeben. Dieser Fehler initiiert das technische System, diese Eingaben abzuweisen (Sicherheitsfunktion).

- C2: Bei diesem Barrierensystem erfolgt die Barriereninitiiierung durch das technische System, das vom Menschen kontinuierlich ein Signal wahrnimmt. Ohne aktive Handlung oder Unterlassung des Menschen stößt das technische System selbst den Ablauf der Barrierenfunktion an. Beispiel: Messung von physiologischen Daten des Menschen durch die Maschine, Initiiierung bei Über- und Unterschreitung eines Schwellwertes.
- C3: Diese Variante ist charakterisiert durch einen annähernd vollständigen Ablauf der Barrierenfunktion innerhalb des technischen Systems. Initiiierung, Verarbeitung und Ausführung werden durch die Maschine ausgeführt. Das technische System informiert den Menschen jedoch über die vorgenommenen Maßnahmen. Der menschliche Bediener hat die Möglichkeit, die Ausführung der Sicherheitsfunktion durch die Maschine zu unterbinden (Deaktivierung, BD). In der Abbildung dieser Variante wird also erstmals und ausnahmsweise die Möglichkeit dargestellt, wie es nicht zur Ausführung der Sicherheitsfunktion kommt. Dass es sich hierbei lediglich um eine Möglichkeit handelt, die der Mensch besitzt, soll durch die Strichelung des mit BD beschrifteten Pfeils deutlich werden. Eine weitere Unterscheidung ergibt sich durch die Pfeilspitze und einen Punkt, der die ausgelöste Hemmung der Barrierenfunktion ausdrücken soll. Ein Beispiel für eine Barriere mit einem solchen Barrierensystem ist eine Bremskurve eines punktförmigen Zugbeeinflussungssystems. Initiiierung, Verarbeitung und Ausführung finden durch das technische System

statt, der Triebfahrzeugführer kann sich durch die Taste *PZB Frei* aus der Bremskurve befreien (Deaktivierung der Barriere).

- C4: Diese Variante entspricht weitestgehend dem Barrierensystem C3, jedoch zeigt die Maschine die durchgeführten Handlungen dem menschlichen Bediener nicht an. Der Mensch kann jedoch die Ausführung der Sicherheitsfunktion unterbinden, auch ohne dazu von einem Signal des technischen Systems veranlasst worden zu sein.
- C5 und C6: Die Barrierensysteme C5 und C6 ähneln den Varianten C3 und C4, jedoch ist hier die Möglichkeit der Deaktivierung der Sicherheitsfunktion entfallen. Ein Eingriff des Menschen in die Funktionsweise ist also aufgrund des erhöhten Automationslevels nicht mehr möglich. Ein Beispiel für C5 wäre eine automatische Bremsung an einem PZB-Geschwindigkeitsprüfabschnitt. Die Varianten C5 und C6 werden aus den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen, da es keine menschliche Mitwirkung an der Sicherheitsfunktion gibt. Damit hängt die Zuverlässigkeit der Barriere nicht von der menschlichen Zuverlässigkeit ab. Mit anderen Worten, wegen des Fokus auf die menschliche Leistung im Mensch-Maschine-System werden im Bereich C (bei funktionalen Barrieren) nur noch die Typen C1 bis C4 analysiert.

Barrieren mit Barrierensystemtypen C1 bis C4 sind in jedem Fall grundverschieden von den zuvor beschriebenen Typen A und B, da die Barrierenfunktion durch die Maschine ausgeübt wird. Innerhalb der Fälle C1 bis C4 kann jedoch zusätzlich noch in die Zweiergruppen C1/C2 und C3/C4 unterschieden werden. Bei C1 und C2 kann durch Analyse menschlichen Verhaltens (im Gegensatz zu A und B, wo eine Auftretenshäufigkeit sogleich eine Aussage über die Fehleranfälligkeit der gesamten Barriere erlaubt) lediglich eine Auftretenshäufigkeit für den Fall, dass die Maschine ihre Barrierenverarbeitung und -ausführung durchführen muss, bestimmt werden. Bei einer Barriere mit den Barrierensystemen C3 oder C4 muss zur Angabe von Zuverlässigkeitskenngrößen bewertet werden, wie wahrscheinlich eine Deaktivierung der Sicherheitsfunktion durch den Menschen in einer nicht dazu passenden Situation ist.

Die Zuordnung der Barrieren und ihrer Varianten zu der Klassifikation in funktionale, symbolische und immaterielle Barrierensysteme erfolgt durch die folgenden Kriterien. Bei Ausführung der Barrierenfunktion durch das technische System (Typ C) handelt es sich in jedem Fall um funktionale Barrieren. Bei den Typen A und B, also bei Ausführung der Barrierenfunktion durch einen menschlichen Bediener, hängt es

von der Art der Barrierensysteme ab, ob sie nach der Klassifikation symbolisch oder immateriell ist.

Symbolische Barrierensysteme erfordern einen Akt der Interpretation vom menschlichen Bediener. Immaterielle Barrierensysteme sind im Moment der Arbeitsdurchführung i.d.R. nicht materiell vorhanden, bei der Ausführung der Tätigkeit geht es meistens um das Einhalten einer Vorgabe oder Regel. Bei Barrierensystemen, bei denen vom technischen System eine Nachricht an den Menschen einen Teil der Initiierung darstellt (also Varianten A1, A2, B1 und B2) sind begriffliche Nachrichten beteiligt. Es handelt sich also unabhängig vom Sinneskanal um symbolische Barrierensysteme. Kommt bei Variante A3/B3 eine Nachricht (z.B. über den akustischen Sinneskanal) von einem anderen Mensch-Maschine-System zum menschlichen Bediener, handelt es sich bei dieser Nachricht ebenso um ein symbolisches Barrierensystem. Wenn die eingehende Information bei der Variante A3/B3 ein Signal aus der Situation repräsentiert, muss es sich um ein immaterielles Barrierensystem handeln. Dieses Signal geht dann nicht von einem geplant eingesetzten Barrierensystem aus, sondern die gespeicherte Regel ist das Barrierensystem. Bei Variante A4/B4 handelt es sich um eine kontinuierliche Information von außen, die einer Interpretation und in einem bestimmten Moment einer Handlung bedarf. Das Barrierensystem ist in diesem Fall stets eine Regel, eine Vorgabe oder ein organisatorisches Prinzip, an das sich der menschliche Bediener zu halten hat. Barrierensysteme der Varianten A4 und B4 sind also in jedem Fall immateriell.

Barrierensysteme der Varianten A1 bis B4 sind also entweder symbolisch oder immateriell. In vielen Fällen sind auch bei symbolischen Barrierensystemen prinzipiell Regeln mit der Barriereninitiierung oder -verarbeitung eng verknüpft. Die nicht materiellen Regeln werden in diesen Fällen jedoch von den Nachrichten (mit dem Charakter symbolischer Barrierensysteme) vollständig dominiert und überlagert. Barrieren sind normalerweise entsprechend ihrer Barrierensysteme zu klassifizieren. Ist z.B. das einzige Barrierensystem einer Barriere symbolisch, so kann auch von einer symbolischen Barriere gesprochen werden. Bei Barrieren mit mehreren Barrierensystemen kann es vorkommen, dass die Barriere sowohl symbolische als auch immaterielle Barrierensysteme enthält. In diesem Fall ist die Barriere als symbolisch zu klassifizieren.

Eine Übersicht über mögliche Varianten der Mensch-Barrieren-Interaktion wird durch eine Zusammenstellung aller barrierensystemspezifischen Folien möglich. Hier lässt sich auch die Einteilung zu funktionalen, symbolischen und immateriell-

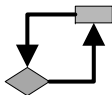

Barrierenverarbeitung (BP)	Barrierenausführung (BE)
Ableitung einer Handlung (Durchlauf der kognitiven Verarbeitungsschleife)	Handlungsausführung (Steuerung)
	

Tabelle 6.1: Barrierenverarbeitung und -ausführung als Steuerung bei Barrieren Typen A und B

len Barrierensystemen noch einmal darstellen. Der gesamte Überblick wird durch Abbildung A.1 im Anhang gegeben.

6.3 Analyse symbolischer und immaterieller Barrieren (Typen A und B)

In diesem Abschnitt soll die menschliche Informationsverarbeitung und die Aufgabenkomplexität für die Typen von Barrieren analysiert werden, bei denen der menschliche Bediener die Sicherheitsfunktion ausführt. Zur Abbildung der Informationsverarbeitung wird auf die Modellierung der kognitiven Verarbeitungsschleife (Abbildung 4.5 auf Seite 83) zurückgegriffen. Dieses Modell wird mit den Diagrammen der Mensch-Barrieren-Interaktion zusammengebracht.

Bei der Barriereninitiierung handelt es sich um die Schritte der Wahrnehmung bis hin zur Erkenntnis des Problems. Die Barrierenverarbeitung repräsentiert die Ableitung einer Handlung und die Ausführung dieser Handlung entspricht der Barrierenausführung, siehe Tabelle 6.1. Handelt es sich um eine länger andauernde Handlung, bei der Rückmeldungen in einem Zeitfenster bis 3 s erfolgen, ist die Barrierenausführung eine Regelung (Tabelle 6.2). Sie ist nur bei Typ A möglich. Man kann diese im Eisenbahnverkehr nur bei der Regelung der Geschwindigkeit auftretende Tätigkeit auch als Barrierenregelung (barrier control) bezeichnen. Dies ist der einzige Fall, in dem die Barrierensysteme auch während der Barrierenausführung und nicht nur während der Initiierung eine Rolle spielen.

Barrierenverarbeitung (BP)	Barrierenausführung (BE)
Ableitung einer Handlung (Durchlauf der kognitiven Verarbeitungsschleife)	Handlungsausführung (Regelung)

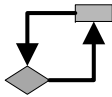
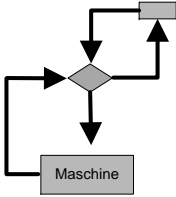
	
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

Tabelle 6.2: Barrierenverarbeitung und -ausführung als Regelung bei Barrieren Typ A

Zur Analyse der Fehleranfälligkeit einer Barriere der Typen A und B soll in erster Linie die Barriereninitiiierung herangezogen werden, da sie aus ingenieurtechnischer Sicht leicht einzuschätzen ist. Das zugrunde liegende Modell ist eine ansteigende Fehleranfälligkeit bei steigendem, kognitiven Ressourcenbedarf. Zur Bewertung der Barriereninitiiierung werden die folgenden Kriterien verwendet, die im Anschluss erläutert werden.

- aktive gegenüber passive Initiiierung
- Anzahl der Barrierensysteme
- automatisierter gegenüber nicht automatisierter Durchlauf der kognitiven Informationsverarbeitungsschleife
- Zeitverfügbarkeit

Die Kriterien 1 und 2, also die Art der Initiiierung und die Anzahl der Barrierensysteme, hängen miteinander zusammen und werden gemeinsam beschrieben. Die Barriereninitiiierung kann bei Barrieren vom Typ A und B auf unterschiedliche Weise stattfinden, abhängig von der Art und der Anzahl der Barrierensysteme. Es muss zunächst zwischen aktiver und passiver Initiiierung unterschieden werden. Bei Initiiierung des Barrierensystems von außen (A1, A3, B1, B3) beginnt die Initiiierung mit einer Wahrnehmung eines punktuellen Signals im Modell der Informationsverarbeitungsschleife (aktive Initiiierung). Bei allen anderen Barrierensystemen beginnt die Initiiierung im Menschen nach einer oder parallel zu einer Wahrnehmung eines kontinuierlichen Signals. Mit anderen Worten, bei den Varianten A2, A4, B2 und B4 muss der menschliche Bediener die Wahrnehmung zunächst geplant haben (passive

Initiierung). Die Barriereninitiierung endet in der Regel mit einem Durchlauf der Informationsverarbeitungsschleife mit dem Schritt *Problem erkennen*. Der Unterschied wird in Tabelle 6.3 verdeutlicht, die beiden wichtigsten Initiierungen werden einander gegenübergestellt. Die Einteilung verschiedener Signalverläufe zur aktiven und passiven Initiierung zeigt Tabelle 6.4: es ist dargestellt, von welcher Art Initiierung ausgegangen werden kann, in Abhängigkeit von der Veränderung der wiedergegebenen Information und der Verfügbarkeit des Signals für den menschlichen Bediener. Eine geringe Anzahl von Barrierensystemen und eine aktive Initiierung vereinfachen den Umgang des Menschen mit den Signalen.

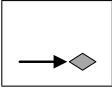


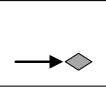

Anstoß durch eine Wahrnehmung	Anstoß durch die Planung einer Wahrnehmung
Varianten A1, A3, B1, B3	Varianten A2, A4, B2, B4
<div>1. </div> <div>2. </div>	<div>1. </div> <div>2. </div> <div>3. </div>
Aktivierendes Signal	Nicht aktivierendes Signal
Aktive Initiierung	Passive Initiierung

Tabelle 6.3: Zwei verschiedene Initiierungen bei Barrieren Typen A und B

Die qualitative Analyse von Barrieren der Typen A und B soll – so weit sie an dieser Stelle nach Vorstellung der Analyseprinzipien und der ersten beiden Bewertungskriterien bereits möglich ist – an zwei Beispielen veranschaulicht werden.

- Abgabe einer Warnung durch den Triebfahrzeugführer bei einem Hindernis im Gegengleis → siehe Tabelle 6.5
- Abbremsung nach einem *Langsamfahrt erwarten* zeigenden Vorsignal → siehe Tabelle 6.6

Das erste Beispiel gehört zum Barrierentyp B, da die Ausführung der Barrierenfunktion zu einem Ziel außerhalb des betrachteten Mensch-Maschine-Systems gerichtet ist. Es handelt sich um ein immaterielles Barrierensystem einer Regel, da das Hindernis im Gegengleis nicht als Barrierensystem bewusst installiert ist. Darüber hinaus ist die Initiierung aktiv, da eine plötzliche Veränderung bei der Wahrnehmung der voraus liegenden Strecke direkt ein Problembewusstsein anstößt. Barriereniniti-

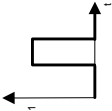
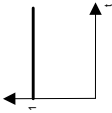
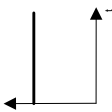
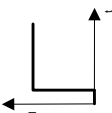
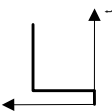
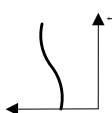
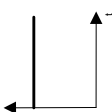
Nummer	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Verfügbarkeit des Signals für den Menschen					
Signalverlauf					
Beispiel	Signaltafel	Streckensignal	Leuchtmelder	Tacho	Schild im Führerstand
Art des Signals	Punktuelltes Signal		Kontinuierliches Signal		
Initiierung	Aktive Initiierung		Passive Initiierung		

Tabelle 6.4: Zuordnung verschiedener Signalverläufe zur aktiven und passiven Initiierung

ierung, -verarbeitung und -ausführung laufen in der Weise ab, wie in Tabelle 6.5 dargestellt.

Ein *Langsamfahrt erwarten* zeigendes Vorsignal ist ein symbolisches Barrierensystem. Es wirkt innerhalb der Barriere zusammen mit dem zweiten, ebenso symbolischen Barrierensystem, dem Tacho. Bei der Zusammenstellung des Mensch-Barrieren-Interaktionsdiagramms müssen die Folien A1 (Vorsignal) und A2 über die Basisfolie A_Basis gelegt werden. Da die Geschwindigkeit über einen gewissen Zeitraum zu regeln ist, kann von einer Regelung gesprochen werden.

Die Barriere des zweiten Beispiels weist zwei Barrierensysteme auf, ist also grundsätzlich komplexer als eine Barriere mit nur einem Barrierensystem. Grundlage für diese Bewertung sind Forschungserkenntnisse, die Aufgaben mit geteilter Aufmerksamkeit einen höheren, kognitiven Ressourcenbedarf zuordnen ([98], S. 51). Dass eine aktive Initiierung weniger fehleranfällig ist als eine passive Initiierung, lässt sich aus der Unterscheidung in aktive und monitive Aufgaben aus der Systemergonomie ableiten. Monitive, also überwachende Aufgaben besitzen höhere kognitive Anforderungen [20]. Mit Hinweisreizen ist auch von einer zügigeren Verarbeitung auszugehen ([98], S. 50).

Das dritte Kriterium zur Analyse der Barriereninitiierung ist der Vergleich zwischen automatisierten und nicht automatisierten Durchläufen der kognitiven Informationsverarbeitungsschleife. Dass ein automatisierter Durchlauf eine geringe Fehlerwahrscheinlichkeit aufweist, kann angenommen werden [98], [134].

Im Schleifenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung bedeutet ein automatisierter Durchlauf, dass die Schleife zwar durchlaufen wird, dass jedoch aus den Heuristiken direkt das Ziel abgeleitet werden kann, ohne dass auf die Konzepte und Handlungsschemata zurückgegriffen werden muss. Dies soll für Barrierensysteme gelten, die besonders häufig auftreten und intuitiv und leicht verständlich sind. Bei ihnen kann der menschliche Bediener das Problem und die daraus resultierend abzuleitende Handlung sehr schnell und zuverlässig herleiten. Von einem automatisierten Durchlauf soll ausgegangen werden, wenn ein Barrierensystem ein bestimmtes Niveau an Auftretenshäufigkeit und Verständlichkeit überschreitet. Dazu können die Tabellen 6.8 und 6.9 als Maßgabe dienen. Beide Größen können mithilfe der Tabellen auf einer semi-quantitativen Skala von 1 bis 5 Punkten bewertet werden. Nach Addition der Punkte kann der erhaltene Wert mit einem Schwellwert, z.B. 6, verglichen werden, über dem von einer automatisierten Verarbeitung ausgegangen

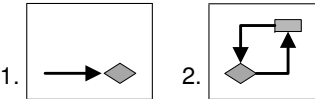
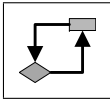

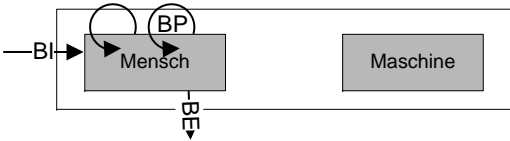
Barrierenzweck	Abgabe einer Warnung bei einem Hindernis im Gegengleis
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere
Barriersysteme	Regel
Klassifikation	Immateriell Aktive Initiierung B3
Barriereninitiierung	Wahrnehmen des Hindernisses im Gegengleis
Barrierenverarbeitung	Ableitung der Handlung <i>Abgabe einer Warnung</i>
Barrierausführung	Abgabe der Warnung
Barriereninitiierung	
Barrierenverarbeitung	
Barrierausführung	
Interaktionsdiagramm	

Tabelle 6.5: Beispiel: Abgabe einer Warnung bei einem Hindernis im Gegengleis

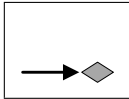
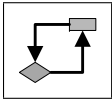
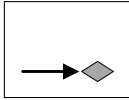
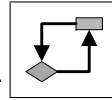
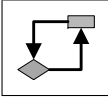
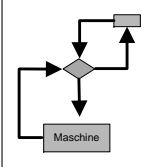
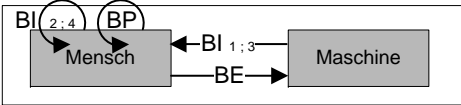
Barrierenzweck	Abbremsung auf Langsamfahrt nach einem <i>Langsamfahrt erwarten</i> zeigenden Vorsignal	
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere	
Barriersysteme	Vorsignal	Tacho
Klassifikation	Symbolisch	Symbolisch
	Aktive Initiierung	Passive Initiierung
	A1	A2
Barriereninitiierung	Wahrnehmung des Vorsignals und des Tachos sowie die Erkenntnis, dass die aktuelle Geschwindigkeit zu hoch ist	
Barrierenverarbeitung	Verständnis, dass eine Bremsung einzuleiten ist	
Barrierausführung	Einleiten der Bremsung (Regelung)	
Barriereninitiierung	1. 	2. 
	3. 	4. 
Barrierenverarbeitung		
Barrierausführung		
Interaktionsdiagramm		

Tabelle 6.6: Beispiel: *Langsamfahrt erwarten* zeigendes Vorsignal

werden könnte. Die Darstellung im Sinne der bereits verwendeten Piktogramme findet sich in Abbildung 6.7.

Treten in einer Barriere mehrere symbolische Barrierensysteme auf, können Durchläufe der kognitiven Informationsverarbeitungsschleife erst ab einem höheren Wert automatisiert stattfinden, da nicht nur das Problem identifiziert, sondern zunächst außerdem eine Folgewahrnehmung abgeleitet werden müssen.

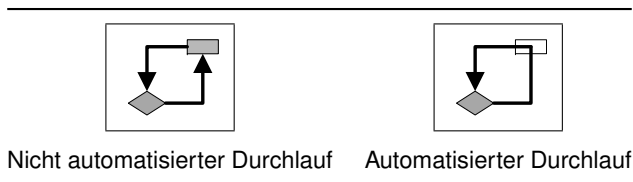


Tabelle 6.7: Arten des Durchlaufs der kognitiven Verarbeitungsschleife

Das vierte zentrale Kriterium für die Bewertung der Fehleranfälligkeit ist die zur Verfügung stehende Zeit. „Für eine signifikante Erniedrigung der Fehlerwahrscheinlichkeit muss die zur Verfügung stehende Zeit etwa um den Faktor 2 größer sein als die benötigte Zeit“ (aus [20]).

Für die Bewertung der Barriereninitiierung wurden also vier Hauptkriterien vorgeschlagen, die die Fehleranfälligkeit begünstigen. Die Kriterien lassen sich noch um eine Reihe sekundärer Punkte ergänzen:

- Ein räumlicher Abstand zwischen Barrierensystemen erhöht die Fehleranfälligkeit, da hier eine verteilte Aufmerksamkeit nötig ist [98], [190].
- Ein zeitlicher Abstand zwischen Barriereninitiierung (Auftreten des Barrierensystems) und Ausführungszeitpunkt der Barrierenfunktion kann die Komplexität ebenso erhöhen, da der menschliche Bediener die Anforderung speichern muss.
- Erscheinen die Signale der verschiedenen Barrierensysteme auf dem selben Sinneskanal, werden ähnliche Ressourcen beansprucht und die Fehleranfälligkeit steigt (*Multiple Ressource Theory* [190]).

Der zeitliche Verlauf der Aufgabe wird im Rahmen der Mensch-Barrieren-Interaktion durch Barrierenregelung und Barrierensteuerung modelliert. Eventuell auftretende Phänomene der Unter- oder Überforderung entstehen aus dem Spektrum paralleler Aufgaben und gehen als leistungsbeeinflussende Faktoren zunächst nicht in die

Stufe	Häufigkeit in Worten	Häufigkeit in Arbeitsstunden zwischen Auftreten
1	Seltener als einmal pro Jahr	> 1728
2	Einmal pro Jahr bis einmal im Monat	144 bis 1728
3	Einmal im Monat bis einmal in 2 Tagen	12 bis 144
4	Einmal in 2 Tagen bis einmal pro Stunde	1 bis 12
5	Häufiger als einmal pro Stunde	< 1

Tabelle 6.8: Einteilung der Häufigkeit

Stufe	Verständlichkeit	Darstellung der abzuleitenden Handlung
1	sehr gut	direkt dargestellt, z.B. ablesbar
2	gut	indirekt dargestellt, z.B. symbolisch
3	durchschnittlich	unklar dargestellt, z.B. abgekürzt
4	schlecht	nicht dargestellt
5	sehr schlecht	nicht dargestellt und Signal uneindeutig

Tabelle 6.9: Einteilung der Verständlichkeit

in diesem Schritt errechnete Basiswahrscheinlichkeit für diese Mensch-Barrieren-Interaktion ein.

Es konnte bislang nicht gezeigt werden, dass Barrieren mit symbolischen Barrierensystemen grundsätzlich weniger fehleranfällig sind als Barrieren mit immateriellen Barrierensystemen. Spontan auftretende Hindernisse im Gleis beispielsweise (immateriell, weil nicht als Barrierensysteme konzipiert) können als Hinweisreize eventuell sogar eher eine richtige Interpretation zur Folge haben als kontinuierliche Anzeigen (symbolisch).

Eine abschließende Diskussion zur Bewertung der Barrierenkomplexität folgt am Ende des Abschnitts 6.5.

6.4 Analyse funktionaler Barrieren (Typ C)

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Typen A und B kommt es bei C1 und C2 bei einer fehlerhaften Ausführung einer Tätigkeit durch den Menschen nicht sofort zu einem Ausfall oder einer Gefährdung. Es kann also nicht die Ausfallwahrscheinlichkeit, sondern nur eine Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmt werden. Es ist die Wahrscheinlichkeit von Interesse, wie häufig die Barrierenfunktion angestoßen bzw. durch einen Fehler des menschlichen Bedieners in Anspruch genommen wird. Bei den Typen C1 und C2 wird die Barrierenverarbeitung und -ausführung durch die Maschine übernommen. Bei C1 wird sie dazu durch eine fehlerhafte Ausführung einer Leistungsfunktion durch den Menschen initiiert, englisch: performance function failure (PFF). Es kann sich wie bereits erläutert nicht um eine Sicherheitsfunktion handeln, es würde dann eine Barrierenausführung (BE) im Sinne der Barrieren des Typs A stattfinden. Ebenso kann es sich in der Regel nicht um eine richtige Ausführung einer Leistungsfunktion handeln, denn durch diese Leistungsfunktion wird die Ausführung einer Sicherheitsfunktion angestoßen. Eine solche Verknüpfung ergibt in der Praxis keinen Sinn.

Die Varianten C1 und C2 sollen nochmals genauer hinsichtlich der Mensch-Maschine-Interaktion analysiert werden. Im Fall C1 muss die Mensch-Barrieren-Interaktion nochmals durch die Kombination verschiedener Folien zusammengesetzt werden. Als Basis dienen in diesem Fall die bereits vereinigten Kombinationen von C1 und der C-Basis-Folie. Vor der beobachtbar fehlerhaften Ausführung der Leistungsfunktion findet beim menschlichen Bediener eine Verarbeitung statt (performance function processing; PFP). Es handelt sich um die Ableitung einer Handlung aus einer bestimmten Initiierung (performance function initiation; PFI). Es handelt sich also um einen ähnlichen Vorgang wie bei den Typen A und B mit dem prinzipiellen Unterschied, dass die Initiierungen nicht Barrierensysteme repräsentieren. Bei der Zusammenstellung des Diagramms der Mensch-Barrieren-Interaktion für die Variante C1 kann auf die Folien A1 bis A4 zurückgegriffen werden. Sie werden hier als PF1 bis PF4 bezeichnet, Abbildung 6.8.

Der Typ C2 existiert wie in Abbildung 6.8 zu sehen, zusammengesetzt aus der Folie C2 und der C-Basis-Folie. Hier gibt es keine weiteren Folien, der Typ C2 ist in dieser Darstellung unveränderlich. Wenn die Maschine ein kontinuierliches, z.B. physiologisches Signal, vom Menschen empfängt, tritt die Barriereninitiierung mit der Über- oder Unterschreitung eines Schwellwertes ein. Diese Analyse ist von der gemessenen Größe abhängig und kann sehr komplex sein. Von einem menschlichen

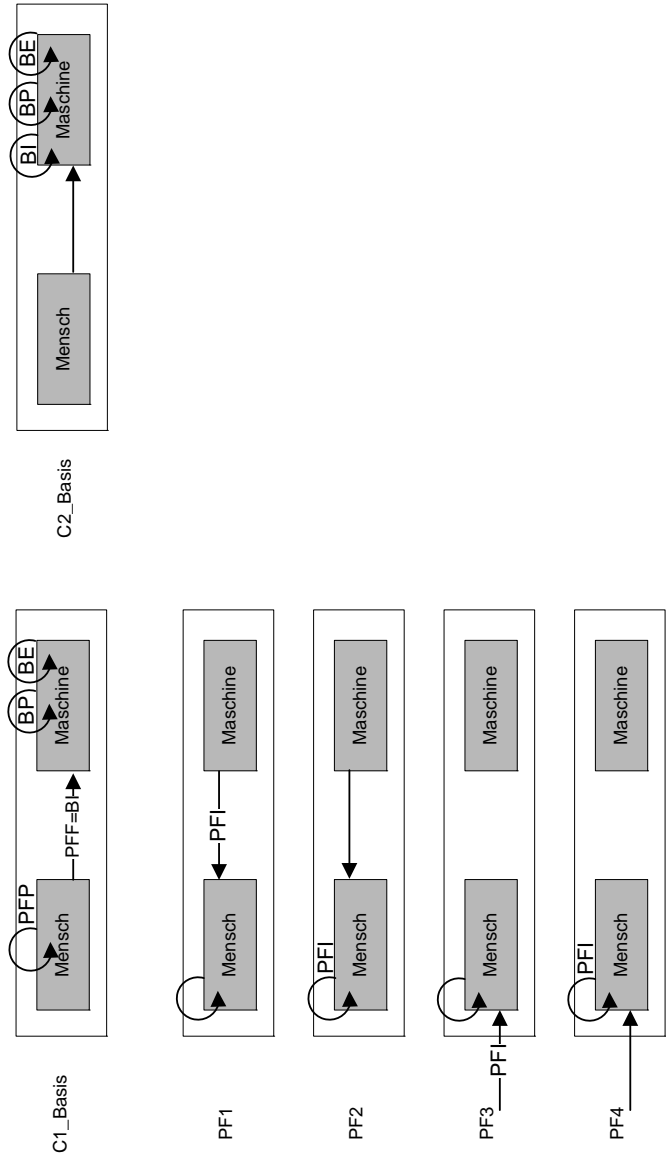


Abbildung 6.8: Verschiedene Ausprägungen der Varianten C1 und C2 der Mensch-Barrieren-Interaktion

Fehler im klassischen Sinne kann jedoch nicht gesprochen werden (vgl. Definitionen in Abschnitt 3.2), so dass dieser Typ C2 an dieser Stelle nicht weiter untersucht wird.

Bei Barrieren des Typs C3 und C4 kommt es bei Barrierendeaktivierung durch den Menschen *nicht* zur Ausführung der Barrierenfunktion. Es ist also die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, dass der menschliche Bediener die Barriere in einer Situation deaktiviert, in der die Barrierenfunktion erforderlich ist. Hier wird also eine Wahrscheinlichkeit für den gefährlichen Ausfall der Barrierenfunktion analysiert. Bei den Typen C3 und C4 wird die Barriereninitiiierung, -verarbeitung und -ausführung vollständig durch die Maschine übernommen. Bei C3 gibt das technische System Informationen über den Barrierenverlauf an den Menschen, bei C4 nicht. Der menschliche Bediener kann die Barriere durch eine *barrier deactivation execution* (BDE) außer Kraft setzen. Hierbei kann es sich nur um eine Handlungsausführung und nicht um eine Unterlassung handeln. Vorausgegangen sind in diesem Fall eine *barrier deactivation initiation* (BDI) und ein *barrier deactivation processing* (BDP). Die Verarbeitung (BDP) findet stets beim menschlichen Bediener statt. Die Initiiierung (BDI) kann also erneut entweder aktiv oder passiv sein und vom technischen System oder von außerhalb dieses Mensch-Maschine-Systems kommen. Es handelt sich um ähnliche Interaktionen wie die Folien A1 bis A4, die Folien stellen jedoch im Gegensatz zu A1 bis A4 keine Barrierensysteme dar. Das vollständige Diagramm der Mensch-Barrieren-Interaktion ist erneut durch Kombination mehrerer Folien zu erhalten. Als Basisfolien dienen die bereits kombinierten Folien C_Basis sowie C3 bzw. C4 entsprechend (oben in der Abbildung 6.9). Mit diesen neuen Basisfolien sind die Folien BD1 bis BD4 zu kombinieren. Es ergeben sich zwangsläufig einige Abweichungen bei BD1 bis BD4: bei BD2 fällt der Pfeil vom technischen System zum Menschen weg. Er ist bei C3 bereits in der Basisfolie enthalten. Bei C4 ist es die Eigenschaft des Mensch-Maschine-Systems, dass dieser Informationsfluss nicht stattfindet, daher auch der Wegfall von BD1 in der zweiten Spalte in der Abbildung 6.9.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass erstens die Komplexität der Barrieren des Typs C1 ähnlich zu den Typen A und B analysiert werden kann und dass zweitens die Fehleranfälligkeit der Barrieren C2 und C3/C4 aufgrund der Eigenheiten von Fall zu Fall einzuschätzen ist. Weitere Ausführungen folgen am Ende des folgenden Abschnitts.

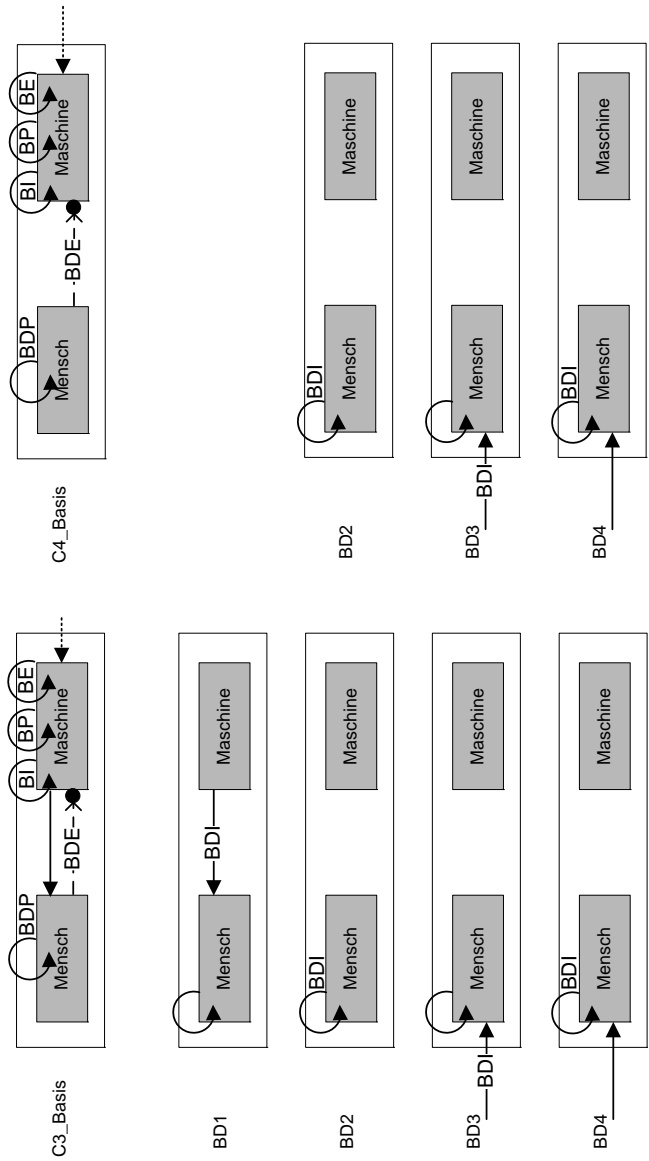


Abbildung 6.9: Verschiedene Ausprägungen der Varianten C3 und C4 der Mensch-Barrieren-Interaktion

6.5 Analyse menschlicher Fehler in der Mensch-Barrieren-Interaktion

Die Diagramme der Mensch-Barrieren-Interaktion ermöglichen die Darstellung des vorgeschriebenen und des möglichen Systemverhaltens. Abweichungen vom vorgeschriebenen Verhalten sind definitionsgemäß Fehler. Ziel der folgenden Erläuterungen ist die Analyse, welche Fehlerarten bei welchem Barrierentyp auftreten und welche Auswirkungen sie haben. Bezüglich Ausführungsfehlern wird die Aufteilung beibehalten, die bereits mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler (vorgestellt in Abschnitt 4.1 auf Seite 73) eingeführt wurde: oberhalb eines Schwellwerts gelten Ausführungsfehler als schlicht falsche Handlung auf der Situationsebene.

Die menschliche Informationsverarbeitung kann unabhängig vom Barrierentyp mit Initiierung, Verarbeitung und Ausführung beschrieben werden. Wie bereits zuvor erläutert entspricht diese Dreiteilung nicht der klassischen Unterscheidung Wahrnehmen → Entscheiden → Handeln. Die Initiierung enthält *Wahrnehmung planen, Wahrnehmen, Abgleich mit Konzepten und Handlungsschemata, Vergleichen und Auswahl des nächsten Schritts*. Dabei können mehrere Durchläufe entstehen. Die Initiierung endet mit der zur Erkenntnis des Problems und Auswahl einer Absicht. Die Auswahl des Handlungsziels entspricht der Verarbeitung. Die Umsetzung des Handlungsziel repräsentiert die Ausführung.

Initiierung, Verarbeitung und Ausführung entsprechen den *Barrierenschritten* Barriereninitiierung, Barrierenverarbeitung und Barrierenausführung, wenn es sich um eine Barriere handelt, bei der der menschliche Bediener die Sicherheitsfunktion ausübt. Bei anderen Barrieren handelt es sich um die entsprechenden Schritte zur Ausführung einer Leistungsfunktion (Typ C1) oder zur Deaktivierung einer Barriere (Typen C3 und C4). Diese Zuordnung ist in Tabelle 6.10 dargestellt. In Ergänzung zu den *Barrierentypen* A, B und C muss also im Folgenden zwischen den drei *Barrierenarten* A/B, C1/C2 (bzw. lediglich C1) und C3/C4 unterschieden werden.

Der zentrale Unterschied zwischen den Barrierenarten ist die Art und Weise, mit der die Sicherheitsfunktion umgesetzt wird. Bei den Barrieren der Kategorie C1 wird durch eine fehlerhafte Ausführung einer Leistungsfunktion eine Sicherheitsfunktion seitens des technischen Systems angestoßen. Bei Barrieren der Art C3/C4 wird durch eine menschliche Handlung eine Sicherheitsfunktion deaktiviert. Bei den Barrieren A und B schließlich setzt der menschliche Bediener selbst die Barrieren- und damit die Sicherheitsfunktion um. Kommt es bei dem jeweiligen Prozess zu Fehlern,

Barrierenart	Initiierung, Verarbeitung, Ausführung
A/B	Initiierung, Verarbeitung und Ausführung der Barrierenfunktion (<i>barrier initiation, barrier processing, barrier execution</i>)
C1	Initiierung, Verarbeitung und Ausführung der Leistungsfunktion (<i>performance function initiation, performance function processing, performance function execution</i>)
C3/C4	Initiierung, Verarbeitung und Ausführung der Barrierendeaktivierung (<i>barrier deactivation initiation, barrier deactivation processing, barrier deactivation execution</i>)

Tabelle 6.10: Initiierung, Verarbeitung und Ausführung bei den verschiedenen Barrierenarten

		richtig funktionierender Durchlauf	fehlerhafter Durchlauf
A/B	BI BP BE	Ausführung der Barrierenfunktion	Ausbleiben der Barrierenfunktion
C1	PFI PFP PFE	kein Anstoß der Barrierenfunktion	Anstoß der Barrierenfunktion
C3/ C4	BDI BDP BDE	Barrierendeaktivierung – keine Barrierenfunktion	Barrierenfunktion – keine Barrierendeaktivierung

Tabelle 6.11: Zustandekommen der Barrierenfunktion bei verschiedenen Abläufen auf Verhaltensebene

geschieht jeweils das Gegenteil. Eine Übersicht der Auswirkungen menschlichen Verhaltens auf die Barrierenfunktion gibt Tabelle 6.11.

Im tabellarischen Modell menschlicher Fehler (Seite 73) lassen sich die Auswirkungen der verschiedenen Ausprägungen menschlichen Verhaltens auf der Situationsebene analysieren. Dieses Modell kann auch die menschlichen Handlungen innerhalb der Mensch-Barrieren-Interaktion erklären. Im Kern des Modells wird dazu, abhängig von den drei Barrierenarten, die Auswirkung auf Leistungs- und Sicherheitsfunktionen notiert.

Die Abbildungen 6.10, 6.11 und 6.12 geben die entsprechende Übersicht. Erläutert werden im Folgenden die „normalen“, fehlerhaften Handlungen und die *errors of commission*.

Bei den Barrieren der Typen A und B sind die „normalen“ Fehlhandlungen von größtem Interesse, denn beim Ausbleiben der Barrierenfunktion kann es zu einem Sicherheitsrisiko kommen (s. Abbildung 6.10). Wird die Barrierenfunktion ausgeführt, obwohl sie nicht benötigt ist, kann die Barrierenfunktion einen unerwünschten Leistungsverlust auslösen (*error of commission*).

Bei Barrieren der Kategorie C1 kann bei auf Verhaltensebene richtiger Durchführung der Leistungsfunktion ein *error of commission* entstehen, wenn die Leistungsfunktion in der Situation nicht benötigt ist. Liegt bereits auf Verhaltensebene ein Fehler vor, stößt die Handlung die Sicherheitsfunktion seitens des technischen Systems an. Das heißt, die funktionale Barriere fängt den menschlichen Fehler ab. Bemerkenswert ist, dass bei dieser Barrierenart zunächst einmal kein direktes Sicherheitsrisiko entstehen kann.

Handlungen, die auf Verhaltensebene richtig erscheinen, jedoch auf Mensch-Maschine-Ebene falsch sind, entsprechen bei den Barrieren C3 und C4 sicherheitskritischen *errors of commission*: die Barriere wird deaktiviert, obwohl ihre Wirkung durchaus benötigt wird. Misslingt die Deaktivierung der Barriere, bleibt die Barrierenfunktion unnötigerweise erhalten – dadurch kann es zu einem unerwünschten Leistungsverlust kommen.

Diese Analysen bieten eine Möglichkeit zur Reduktion der Komplexität. Für Sicherheitsbetrachtungen sind in der Regel diejenigen Handlungen mit Sicherheitsrisiko zentral. Fehlern, die „nur“ einen Leistungsverlust auslösen, kann eine geringere Priorität zugewiesen werden. Welche Fehler bei den einzelnen Barrierenarten von höchstem Interesse sind, und welche Folgen für die Barrierenfunktion bei Auftreten

Bewertung der Handlungen auf Situationsebene (Mensch-Maschine-Ebene)			
Normalfall:	richtig	fehlerhaft	
	Bedienung	Auslassung	Typen von Ausführungsfehlern ...
	Auslassung	Bedienung	Typen von Ausführungsfehlern ...
Alternativfall:			
Richtig funktionierender Durchlauf BI – BP – BE	Ausführung der Barrierenfunktion	Richtige Handlung	Errors of commission: Barrierenfunktion trotz nicht benötigter Wirksamkeit (evtl. Leistungsverlust)
	Fehlerhafter Durchlauf BI – BP – BE	(vernachlässigbar)	Fehlerhafte Handlungen: Ausbleiben der Barrierenfunktion (Sicherheitsrisiko)

Abbildung 6.10: Barrieren der Typen A und B verknüpft mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler

	Bewertung der Handlungen auf Situationsebene (Mensch-Maschine-Ebene)		
	richtig	fehlerhaft	
	Bedienung	Auslassung	Typen von Ausführungsfehlern ...
Richtig funktionierender Durchlauf PFI – PFP – PFE	Kein Anstoß der Barrierenfunktion	Richtige Handlung	Errors of commission: falsch, Leistungsfunktion nicht benötigt
Fehlerhafter Durchlauf PFI – PFP – PFE Resultierend in PFF		(vernachlässigbar)	Fehlerhafte Handlungen: Fehler, der durch Barrierenfunktion abgefangen wird (evtl. Leistungsverlust)

Abbildung 6.11: Barrieren des Typs C1 verknüpft mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler

	Bewertung der Handlungen auf Situationsebene (Mensch-Maschine-Ebene)			
	richtig	fehlerhaft		
	Bedienung	Auslassung	Typen von Ausführungsfehlern ...	
Barriere				
Richtig funktionierender Durchlauf BDI – BDP – BDE	Richtige Handlung	Errors of commission: Barriereendeaktivierung trotz benötigter Wirksamkeit (Sicherheitsrisiko!)		
Fehlerhafter Durchlauf BDI – BDP – BDE	(vernachlässigbar)	Fehlerhafte Handlungen: Nutzlose Wirkung der Barrierefunktion (evtl. Leistungsverlust)		

Abbildung 6.12: Barrieren des Typs C3/C4 verknüpft mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler

Barrierenart	Hauptinteresse	Folgen
A/B	„normale“ fehlerhafte Handlungen	Sicherheitsrisiko (Ausfallwahrscheinlichkeit)
C1	„normale“ fehlerhafte Handlungen	Anstoß der Barrierenfunktion (Auftrittswahrscheinlichkeit)
C3/C4	<i>errors of commission</i>	Sicherheitsrisiko (Ausfallwahrscheinlichkeit)

Tabelle 6.12: Hauptinteresse für menschliche Fehler nach Barrierenart

eines solchen Fehlers zu erwarten sind, schildert Tabelle 6.12. Es ist auch noch einmal zu sehen, dass bei der Barrierenart C1 keine Wahrscheinlichkeit für den sicherheitskritischen Ausfall der Barrierenfunktion bestimmt werden kann, sondern lediglich eine Auftretenswahrscheinlichkeit (die Wahrscheinlichkeit, mit der die Barrierenfunktion durch einen menschlichen Fehler angestoßen wird).

Mit diesen Grundlagen lassen sich nun zentrale Aussagen zur Einschätzung menschlicher Fehler in Abhängigkeit von der Barrierenart treffen. Bei Barrieren der Arten A/B und C1 ist die Wahrscheinlichkeit von Interesse, dass bei Initiierung, Verarbeitung und Ausführung ein Fehler entsteht. Es handelt sich also um Fehler auf der Verhaltensebene. Bei der Barrierenart C3/C4 hingegen kann es zu einem sicherheitskritischen Ausfall kommen, wenn *kein* Fehler auf Verhaltensebene vorliegen muss, sondern das Verhalten nicht zur Situation passt.

Bei den Barrierenarten A/B und C1 werden absichtliche Fehler durch eine schlechte Absicht während der Initiierung abgebildet. Es kommt dann zu einer auf Verhaltensebene falschen Handlung, die in aller Regel auch ein Fehler auf der Situationsebene ist. Bei der Barrierenart C3/C4 kann es – in Ergänzung zu den Aussagen aus Tabelle 4.1 und Abbildung 6.12 – nicht nur bei einem korrekten Durchlauf der Verarbeitung, sondern auch bei einer schlechten Absicht zur Barrierendeaktivierung kommen. Im Falle einer schlechten Absicht ist damit zu rechnen, dass die Handlung auch auf Situationsebene als fehlerhaft einzustufen ist. Diese Feststellungen werden in Tabelle 6.13 zusammengestellt.

Barrierenart	Zu bestimmende Wahrscheinlichkeit	auf Verhaltens- ebene
A/B	Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Durchlaufs von Initiierung, Verarbeitung und Ausführung	Fehler
C1	Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Durchlaufs von Initiierung, Verarbeitung und Ausführung	Fehler
C3/C4	Wahrscheinlichkeit des Durchlaufs von Initiierung, Verarbeitung und Ausführung in einer unpassenden Situation	kein Fehler

Tabelle 6.13: Zu bestimmende Wahrscheinlichkeit und Bewertung der Handlung auf Verhaltensebene nach Barrierenart

Für die Einschätzung menschlicher Fehler ist bei den Arten A/B und C1 von Bedeutung, wie komplex (wie schwierig) Initiierung, Verarbeitung und Ausführung der Barrieren- oder Leistungsfunktion sind. Dabei gelten folgende Kriterien:

- Komplexität der Initiierung
- Potential für schlechte Absicht (absichtliche Fehler)
- Potential für Auswahl des falschen Ziels bei guter Absicht (entspricht Komplexität der Verarbeitung)
- Potential für falsche Ausführung bei guter Absicht und korrektem Ziel (entspricht Komplexität der Ausführung)

Wie die Komplexität der Initiierung einzuschätzen ist, konnte in den vorherigen Abschnitten gezeigt werden. Mit der Identifikation der zur Initiierung gehörigen Barrierensysteme ist dafür ein auch ingenieurtechnisch leicht verständlicher Weg vorgeschlagen worden. Der wesentliche Schritt zur vollständigen Bewertung der Fehleranfälligkeit von Barrieren der Arten A/B und C1 konnte damit vorgestellt werden. Die Analyse des Potentials für die anderen drei Fehlerentstehungskriterien, insbesondere des Potentials für absichtliche Fehler, muss künftigen Arbeiten vorbehalten bleiben. Dabei könnten bezüglich absichtlicher Fehler die Arbeiten zur Barrierenunterdrückung eine Grundlage bieten [23], [124]. Zur Analyse der Wahrscheinlichkeit der Auswahl eines falschen Ziels bei guter Absicht sollten kogni-

tionspsychologische Forschungsarbeiten (*Human decision making*) herangezogen werden. Die Analyse der Komplexität der Ausführung kann durch die Kriterien der Systemergonomie unterstützt werden [6], [20].

Die Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit im Rahmen der Barrierenart C3/C4 muss auf andere Art und Weise erfolgen, da hier kein Fehler auf Verhaltensebene vorliegen muss (es sei denn, der menschlicher Bediener deaktiviert die Sicherheitsfunktion mit schlechter Absicht). Es handelt sich in den meisten Fällen lediglich um einen Fehler auf der Situationsebene. Zentrale Fragestellung ist hier, welche Faktoren den Menschen dazu verleiten können, die Barrierendeaktivierung vorzunehmen, obwohl die Situation sie nicht erfordert. Es muss ebenso beachtet werden, dass gleichzeitig davon ausgegangen wird, dass nach einer fälschlichen Initiierung der Barrierendeaktivierung eine korrekte Verarbeitung und Ausführung erfolgt. In anderen Fällen bleibt die Barrierenfunktion erhalten (die Deaktivierung misslingt) und es kann lediglich zu einem Leistungsverlust kommen. Die Analyse der Fehleranfälligkeit einer Barriere der Art C3/C4 hängt von der sehr speziellen Ausprägung ab, wie wahrscheinlich eine falsche Initiierung ist. Wie diese Frage von Fall zu Fall zu entscheiden ist, kann ebenso Gegenstand künftiger Forschung im Bereich der Mensch-Barrieren-Interaktion sein.

6.6 Nutzungsmöglichkeiten der Methode

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, wie die Erkenntnisse aus dem bisherigen Teil dieses Kapitels auf Mensch-Maschine-Interaktionen und Barrieren in der Praxis angewendet werden können. Dabei erfolgt eine Schilderung der erreichten Möglichkeiten im Bereich der Mensch-Maschine-Systemtechnik. Es wird also zunächst auf die prinzipielle Anwendbarkeit der entwickelten Methodik und zugehöriger Modelle eingegangen, bevor im folgenden Unterkapitel die Vorgehensweise bei Anwendung im Eisenbahnverkehr geschildert wird.

Mit der entwickelten Analytik ist es künftig möglich, das Zustandekommen einer Sicherheitsfunktion im Mensch-Maschine-System klar darzustellen. Das Fundament der Mensch-Barrieren-Interaktion sind bewährte Modelle. Die Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren ist in der sicherheitstechnischen Wissenschaft sehr verbreitet und in der Eisenbahntechnik bereits bekannt. Ebenso wird das klassische Modell der dualen Interaktion zwischen Mensch und Maschine verwendet. Für die Abbildung der kognitiven Prozesse des Menschen wurde das moderne Modell

der Informationsverarbeitungsschleife herangezogen, da serielle Modellierungen keine Rückgriffe zulassen. Diese drei Säulen wurden mit einem neuen, tabellarischen Modell menschlicher Verhaltensmöglichkeiten verknüpft. Diese neue Herangehensweise ist in der Lage, erstens die ursachen- und auftretensorientierte Betrachtung menschlicher Fehler voneinander zu trennen und zweitens *errors of commission* zu berücksichtigen. Es ist damit eine ganzheitliche Perspektive auf menschliche Verhaltensmöglichkeiten erreicht worden, die von der modernen Fehlerforschung und vom *Resilience Engineering* bevorzugt wird.

Die Sicherheitsfunktion wird als Funktion einer Sicherheitsvorkehrung, also als Teil einer Barriere, verstanden. Die Allokation der Sicherheit auf Seiten des Menschen bzw. auf Seiten des technischen Systems ist anhand der bekannten Klassifikation in funktionale, symbolische und immaterielle Barrieren möglich: bei funktionalen Barrieren übernimmt im Normalfall die Maschine die Sicherheitsfunktion, bei den anderen beiden Typen obliegt es dem Menschen, die sicherheitsrelevante Barrierenfunktion zu erbringen. Verknüpft man die Barrierenarten mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler, können die Risiken der einzelnen Arten direkt offen gelegt werden. Es wurde gezeigt, dass das größte Risiko bei menschlichem Fehlverhalten bei symbolischen und immateriellen Barrieren (Art A/B) liegt.

Für die detaillierte Analyse, durch welche Interaktion im Mensch-Maschine-System eine Sicherheitsfunktion erbracht wird, ist die Barrierenfunktion in die drei Schritte Initiierung, Verarbeitung und Ausführung zerlegt worden. Diese drei Schritte können jeweils entweder dem Menschen, der Maschine oder einem Informationsfluss zwischen beiden oder einem Fluss, der auf eines der beiden Elemente gerichtet ist, zugeordnet werden. Mit Nutzung der Diagramme der Mensch-Barrieren-Interaktion kann die Analyse mit leicht verständlichen Abbildungen hinterlegt werden. Sämtliche Interaktionen und Varianten lassen sich systematisch darstellen. Die Diagramme setzen sich wie ein Baukastensystem zusammen, das die Kombinationen einer Vielzahl von möglichen Interaktion abbilden kann. Das System und die Kategorien A, B, C sowie A/B, C1 und C3/C4 decken die auftretenden Möglichkeiten ab. Sie können jedoch um weitere Varianten oder sogar Typen ergänzt werden, falls im Anwendungsfall eine andere Ausprägung der Interaktion und Sicherheitsfunktion vorliegt.

Eine Einschätzung der Art und Weise, wie Mensch und Maschine miteinander gekoppelt sind, und durch welche Interaktionsschritte eine Sicherheitsfunktion erbracht wird, war im Bereich der Methoden zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im beschriebenen Detaillierungsgrad und auf generischer Basis bisher nicht möglich.

Die neue Entwicklung kann also im Bereich der HRA-Verfahren eine Lücke im Bereich der qualitativen Analyse schließen. Darüber hinaus ergibt sich über die entwickelten Kriterien die Möglichkeit, verschiedene Barrieren oder verschiedene Ausprägungen von Barrieren einander gegenüberzustellen, um ihre Fehleranfälligkeit zu vergleichen. Dieser Punkt ist für die sicherheitliche Gestaltung eines Teilsystems in jedem Fall hilfreich. Langfristig sollte es das Ziel sein, die erhaltenen Ergebnisse zur Vorhersage von Wahrscheinlichkeiten menschlicher Fehler, also zu quantitativen Angaben, weiterzuführen. Die Schritte 2b) und 2c) der Methode wurden in Kapitel 5 bereits vorgezeichnet. Mit Forschungen in diese Richtung könnte auch der Anwendungsfall 3, die quantitative Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit, zufriedenstellend beantwortet werden.

Die Mensch-Barrieren-Interaktion ist zwar mit Blick auf die Arbeitssysteme von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern entwickelt worden, ein Transfer der Methodik auf einen anderen Industriekontext ist jedoch ohne Probleme möglich. Einzige Randbedingung ist, dass die Arbeitssysteme stark durch mentale Tätigkeiten, also kognitiv beanspruchende Arbeiten, geprägt sein sollten. Sind Werkzeuge oder größere Instrumente im Einsatz oder ist der menschliche Bediener gezwungen, sein Arbeitssystem häufig zu wechseln, so müsste die Analytik für den Transfer angepasst werden. In solchen Fällen würden diese Tätigkeiten unter Umständen eine andere Belastung erzeugen, als die Skalierung bzw. *These komplexere Interaktion → höhere Beanspruchung → höhere Fehleranfälligkeit* der Mensch-Barrieren-Interaktion es zulässt.

Dieses Unterkapitel hat gezeigt, dass für die Mensch-Maschine-Systemtechnik einige Vorsprünge erreicht werden konnten. Aufgrund ihres generischen Charakters sind die Entwicklungen nicht nur im Eisenbahnverkehr anwendbar.

6.7 Anwendung der Methode im Eisenbahnverkehr

Die Diskussion im vorherigen Unterkapitel hat einen Blick auf die grundsätzlichen, neuen Möglichkeiten der Mensch-Barrieren-Interaktion geworfen. Im Folgenden sollen nun die Nutzungsmöglichkeiten der in dieser Arbeit entwickelten Analytik im konkreten Anwendungsfall erläutert werden. Exemplarisch wird die Vorgehensweise im Eisenbahnverkehr geschildert. Dafür werden zunächst noch einmal die beiden Anwendungsfälle umrissen.

1. Qualitative Integration von menschlichen Einflussfaktoren in Sicherheitsbetrachtungen
2. Systematischer Vergleich der Zuverlässigkeit von vorliegenden oder entworfenen Sicherheitsvorkehrungen

Der erste Anwendungsfall beschreibt den Bedarf nach einer qualitativen Analyse von Sicherheitsvorkehrungen in einem bestimmten Kontext, bei denen menschliche Bediener eine Mitwirkung haben. Benötigt wird eine Beschreibung des Zustandekommens der Sicherheitsfunktion, um abzuschätzen, bei welchen Ereignissen sie nicht erfüllt wird. Außerdem müssen die Punkte identifiziert werden, wo aus menschlichen Tätigkeiten Risiken erwachsen. Diese Analysen dienen dazu, Sicherheitsvorkehrungen zu evaluieren, z.B. wenn neue Barrieren in ein System hineingebracht werden sollen. Im Eisenbahnverkehr werden diese Informationen beispielsweise bei der Dokumentation von RAMS-Einflussfaktoren im Rahmen einer Sicherheitsbetrachtung benötigt. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle, die -Interaktion sowie die *Human factors risks* müssen in einem solchen Fall identifiziert werden. Die im Anschluss geschilderte Vorgehensweise der Mensch-Barrieren-Interaktion ermöglicht zunächst eine Beschreibung von Details der Barriere. Dazu gehören das Zustandekommen der Sicherheitsfunktion mit der Analyse der Interaktionsschritte. Dies ist für Dokumentationen zur Sicherheit eines Gesamtsystems bereits sehr hilfreich. Außerdem können diese Informationen Grundlage für Modifikationen von Sicherheitsvorkehrungen sein. Nach der Klassifikation der Barriere kann abgeschätzt werden, welches Risiko bei einem menschlichen Fehler entsteht. Je komplexer die Mensch-Maschine-Interaktion, desto höher die Wahrscheinlichkeit für eine menschliche Fehlhandlung. Abhängig von der Barrierenart kann das Schadensausmaß abgeschätzt werden. Insgesamt kann der Anwendungsfall der qualitativen Analyse und der Integration von menschlichen Faktoren in Sicherheitsbetrachtungen mit der entwickelten Methodik zügig bearbeitet werden.

Die qualitative Analyse ermöglicht unabhängig vom industriellen Kontext die Gegenüberstellung von Barrieren, die einem ähnlichen Zweck dienen. Das wichtigste Szenario der Anwendung der Mensch-Barrieren-Interaktion ist das Vergleichen von Barrieren, bei denen der Mensch einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktion hat. Der Vergleich von Barrieren mit der Mensch-Barrieren-Interaktion kann allgemein genutzt werden, er wird jedoch im Anschluss im Kontext des Anwendungsfalls 2 aus dem Eisenbahnverkehr erläutert. Im Eisenbahnkontext ist ein Vergleich besonders dann von Interesse, wenn eine Sicherheitsbetrachtung für ein Teilsystem durchgeführt wird, das neu eingeführt werden soll. In einem solchen Fall kann das Risiko mit dem Akzeptanzkriterium *Mindestens gleiche Sicherheit* zu überprüfen sein. Eine

neue Sicherheitsvorkehrung muss also gegenüber einem Altsystem bewertet werden. In einem solchem Vergleich können Barrieren anhand mehrerer Kriterien bewertet, in ihrer Fehleranfälligkeit eingeschätzt und schließlich für eine Auswahl priorisiert werden.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise erläutert, die zur Beantwortung der Fragestellungen aus *Anwendungsfall 1* nötig ist. Die Analyseschritte für den Vergleich (Fall 2) folgen im Anschluss.

Die Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion bietet eine qualitative Untersuchung inklusive Identifikation, Beschreibung und Risikobewertung von Sicherheitsvorkehrungen mit menschlichem Einfluss. Die Vorgehensweise gliedert sich dabei in mehrere Schritte. Bevor die Analyse von Barrieren und Interaktionen von menschlichen Bedienern mit Barrieren beginnen kann, müssen die Systemgrenzen des Arbeitssystems definiert sein. Hierfür wurden in Kapitel 4 dieser Arbeit die nötigen Grundlagen beschrieben. Es wird also davon ausgegangen, dass die Systeme, mit denen der Mensch interagiert, und die relevanten Umgebungsfaktoren bekannt sind.

Sind die Barrieren eines bestehenden Systems noch nicht bekannt, muss der Analyseprozess mit der Barrierenidentifikation beginnen. Die für eine Identifikation von Barrieren nötige Vorgehensweise ist in Kapitel 5.3 beschrieben worden. Es handelt sich um die erste Komponente der Methode (Komponente 1 aus Abbildung 5.4 auf Seite 109). Wenn das betrachtete System noch keine Barrieren aufweist, müssen Sicherheitsfunktionen respektive Barrieren zunächst konzipiert werden. Bei der Allokation der Sicherheitsfunktion unterstützt Tabelle 6.14.

Der folgende Analyseschritt ist die Komponente 2a) der Methode (ebenso siehe Abbildung 5.4). Er lautet *Analyse von Barrierenfunktion, -systemen, -schritten und -charakteristika*. Der erste Teil dieser Komponente gliedert sich wie folgt:

1. Identifizierung des Barrierenzwecks
2. Klassifikation der Barriere im Prozessmodell
3. Kategorisierung der Barriere nach funktional/symbolisch/immateriell
4. Kategorisierung der Barriere nach Barrierentyp (A, B, C) und Barrierenart (A/B, C1/C2, C3/C4)

Für die Kategorisierung der Barrieren dient die Tabelle 6.14 als Leitfaden. Bei der Konzeption von Barrieren ist sie zusätzlich als Hilfestellung geeignet. Sie muss dann von links nach rechts gelesen werden, wobei die ersten beiden Spalten im Sinne einer Fallunterscheidung zu verstehen sind.

Sicherheitsallokation	Einfluss des Menschen	Barrierenart	Bestimmende Zuverlässigkeit für ein Sicherheitsrisiko	Bewertungsmethode
Sicherheitsverantwortung primär beim Menschen	Mensch leistet die Sicherheitsfunktion	A/B (symbolisch/ immateriell)	menschliche Zuverlässigkeit	Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion
	Reaktion der technischen Sicherheitsfunktion bei menschlichem Fehler	C1/C2 (funktional)	Menschliche Zuverlässigkeit <i>und gleichzeitig</i> Ausfall der technischen Sicherheitsfunktion	Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion und Methoden der technischen Zuverlässigkeit
Sicherheitsverantwortung primär bei der Maschine	Mensch kann Sicherheitsfunktion deaktivieren	C3/C4 (funktional)	Ausfall der technischen Sicherheitsfunktion oder menschliche Zuverlässigkeit (<i>error of commission</i>)	Methoden der technischen Zuverlässigkeit plus Einzelfallentscheidung
	Sicherheitsfunktion vollständig auf Seiten der Technik	C5/C6 (funktional)	Ausfall der technischen Sicherheitsfunktion	Methoden der technischen Zuverlässigkeit

Tabelle 6.14: Übersicht über Barrierenarten, ihre Sicherheitsrisiken und entsprechende Bewertungsansätze

Zusammen mit den Erkenntnissen aus dem vorherigen Unterkapitel wird aus Tabelle 6.14 ersichtlich, dass in Abhängigkeit von der Barrierenart unterschiedliche Zuverlässigkeitsgrößen für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines sicherheitskritischen Ausfalls maßgeblich sind. Die menschliche Zuverlässigkeit soll mit den Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion bewertet werden. Die Bewertung technischer Zuverlässigkeitskenngrößen liegt außerhalb des Spektrums dieser Arbeit.

Nach Durchführung der oben genannten vier Schritte liegt eine Beschreibung der Barrieren, ihrer Barrierensystem, ihrer Funktion und ihrer Charakteristika vor. Über die Kategorisierung nach Barrierentyp und -art sind grundsätzliche Aussagen zum Risiko bei menschlichem Fehlverhalten möglich, z.B. ob ein Sicherheitsrisiko entsteht oder lediglich ein Leistungseinbruch zu erwarten ist. Wesentliche Eckdaten für eine qualitative Risikoanalyse sind somit identifiziert und dokumentiert. Fortgeschrittenere Analysen werden sich für einen Vergleich verschiedener Barrieren interessieren. Diese Untersuchung gleicht dem Anwendungsfall 2 der im Anschluss beschrieben wird.

Zentrales Merkmal für eine Lösung des *Anwendungsfalls* 2 ist eine Gegenüberstellung von Barrieren mit menschlichem Einfluss. Dafür ist die qualitative Analyse wie oben beschrieben notwendige Grundlage. Das heißt, dass die Schritte 1 und 2a) der Methodik bereits durchgeführt sein müssen.

Die wichtigste Barrierenart für einen Vergleich ist die Gruppe A/B, da bei ihnen das Sicherheitsrisiko bei einer menschlichen Fehlhandlung am größten ist. Der Vergleich der Barrieren über Barrierenarten hinweg ist nicht ohne weiteres möglich, da technische und menschliche Zuverlässigkeitswerte in diesem Stadium nicht direkt einander gegenübergestellt werden können. Ein solcher Vergleich ist mit hoher Präzision mittels quantitativer Angaben möglich, die an dieser Stelle nicht vorliegen. Es können dann Ausfallraten technischer Komponenten und Fehlerraten der menschlicher Bediener verrechnet werden. Es wird ein qualitativer Vergleich empfohlen, bei dem bei den Barrierenarten A/B und C1/C2 die Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion zu Rate gezogen werden können (Vorgehensweise s.u.). Die Wahrscheinlichkeit für eine Deaktivierung in einer dazu nicht passenden Situation (*error of commission* bei Barrierenart C3/C4) muss im Einzelfall anhand der Reize zur Deaktivierung bewertet werden.

Die Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion sind in optimaler Weise dazu geeignet, Barrieren innerhalb der Barrierenart A/B miteinander zu vergleichen. Sie

können, wie soeben beschrieben, auch als Hilfestellung für qualitative Vergleiche über Barrierenarten hinweg dienen, z.B. Vergleiche von Barrieren der Art A/B mit C1/C2. Sollen Barrieren der Art A/B hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit einander gegenübergestellt werden, ist aufbauend auf den oben beschriebenen Punkten die Methode wie folgt fortzusetzen:

5. Identifizierung der Barrierenfunktion und der Barrierensysteme, Klassifizierung der Barrierensysteme hinsichtlich funktional/symbolisch/immateriell
6. Analyse der Barrierenschritte (Barriereninitiierung, -verarbeitung und -ausführung),
7. Analyse der Durchläufe der kognitiven Informationsverarbeitung (Piktogramme) und schließlich Angabe des Diagramms der Mensch-Barrieren-Interaktion
8. Analyse der Zeitverfügbarkeit und der erweiterten Kriterien (Barrierencharakteristika)
 - räumliche Distanz zwischen Barrierensystemen
 - zeitliche Distanz zwischen Barrierensystem und Barrierenausführung
 - Informationsübertragung bei Initiierung durch mehrere Barrierensysteme auf demselben Sinneskanal

Der Vergleich wird durch die Erstellung einer Tabelle unterstützt. Die Struktur der auszufüllenden Tabelle wird in der Vorlage in Tabelle 6.15 deutlich. Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise anhand eines Beispiels geschildert. Der Vergleich wird schließlich qualitativ anhand folgender Maßgabe vorgenommen: Je komplexer die Mensch-Maschine-Interaktion, die zur Herstellung einer Sicherheitsfunktion einer Barriere nötig ist, desto fehleranfälliger ist das System. Mit anderen Worten, mit der Komplexität der Barriere sinkt die menschliche Zuverlässigkeit. Die folgenden Punkte dienen bei dem Vergleich zweier Barrieren als Kriterien. Die Fehleranfälligkeit steigt mit

- der Anzahl Barrierensysteme,
- der Anzahl nicht-initiierender Barrierensysteme,
- der Anzahl nicht-automatisierter Durchläufe durch die kognitive Verarbeitungsschleife,
- dem Rückgang der zur Verfügung stehenden Zeit,
- dem räumlichen Abstand zwischen Barrierensystemen,
- dem zeitlichen Abstand zwischen Barrierensystemen und der Barrierenausführung,
- der Anzahl Barrierensysteme, die auf dem selben Sinneskanal Informationen übertragen.

	Barriere 1	Barriere 2
Barrierenzweck		
Klassifikation im Prozessmodell		
Kategorisierung nach funktional/ symbolisch/ immateriell		
Kategorisierung nach Barrierentyp (A, B, C)		
Kategorisierung nach Barrierenart (A/B, C1/C2, C3/C4)		
Barrierensysteme		
Barriereninitiierung		
Barrierenverarbeitung		
Barrierenausführung		
Diagramm der Mensch-Barrieren-Interaktion		
Analyse der weiteren Kriterien		

Tabelle 6.15: Vergleich zweier Barrieren mit der Mensch-Barrieren-Interaktion (Vorlage)

Die Anwendung dieser Kriterien und Beispiele im Eisenbahnsystem werden im folgenden Unterkapitel beschrieben. Mit der Erzielung von Aussagen über die Zuverlässigkeit des Mensch-Barriere-Systems aus der letztendlichen, tabellarischen Gegenüberstellung werden die Fragestellungen aus den weiter oben angesprochenen Anwendungsfällen beantwortet. Die Eigenschaften der Barrieren, z.B. die Allokation menschlicher Tätigkeiten und möglicher Risiken, können nach der Typisierung der Barrieren, eindeutig beschrieben und verglichen werden. Wird eine Barriere mittels der Kriterien zuverlässiger bewertet als eine andere, so ist sie in diesem Punkt der Alternative vorzuziehen. Erläuterungen für Sicherheitsbetrachtungen können mit Tabellen ergänzt und mit den Diagrammen der Mensch-Barrieren-Interaktion veranschaulicht werden.

6.8 Beispiel

Die qualitative Analyse soll in diesem Abschnitt anhand eines Beispiels gezeigt werden. Die Durchführung des Beispiels erstreckt sich von der Identifikation der Barrieren bis zur qualitativen Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion. Schließlich wird ein Vergleich zweier Sicherheitsvorkehrungen vorgenommen, um zu demonstrieren, mit welchem Kriterien eine Priorisierung von Barrieren bzw. eine vergleichende Aussage zum sicherheitlichen Verhalten erreicht werden kann. Das Beispiel eignet sich also auch als Leitfaden, wenn einer der zuvor beschriebenen Anwendungsfälle 1 oder 2 vorliegt.

Es wird in diesem Beispiel davon ausgegangen, dass die zu untersuchenden Barrieren im Eisenbahnsystem bereits vorhanden sind. Daher muss der qualitativen Analyse eine sorgfältige Barrierenidentifikation vorweg gehen. Es wird dabei die Vorgehensweise der Methodik verfolgt, wie sie in Kapitel 5.2 vorgestellt und in Abbildung 5.4 auf Seite 109 zusammengefasst wurde. Das Beispiel erstreckt sich dabei bis zur Komponente 2a), also bis zur qualitativen Analyse von Barrierenfunktion, -systemen, -schritten und -charakteristika. Abschließend wird wie gesagt ein Vergleich von Barrieren vorgenommen, wie sie im vorherigen Unterkapitel beschrieben wurde. Zu besserer Nachverfolgung sind die einzelnen Schritte und die zugehörigen Tabellen und Abbildungen zu Beginn in Abbildung 6.13 dargestellt.

Als Ausgangspunkt dienen in diesem Beispiel die folgenden drei Szenarien:

- Zu schnelles Fahren auf freier Strecke
- Zusammenprall eines Zuges mit einem Straßenverkehrsteilnehmer auf einem nichttechnisch (also nur mit Andreaskreuz) gesicherten Bahnübergang
- Überfahren eines Halt zeigenden Signals (z.B. eines Blocksignals)

Erste Komponente der Methode ist die Barrierenidentifikation. Als erster Schritt werden die Barrieren in den Fehlerbäumen gesucht. Die Fehlerbäume für die drei o.g. Szenarien sind in den Abbildungen A.3, A.4 und A.5 im Anhang dargestellt. Die Barrieren, bei denen eine menschliche Mitwirkung an der Sicherheitsfunktion gegeben ist oder bei denen die Sicherheitsfunktion nur bei einer bestimmten Handlung oder Unterlassung umgesetzt wird, können aus den Bäumen identifiziert werden. Dabei ist zu beachten, dass es im Fokus um die Verdeutlichung des Prinzips der Identifikation von Barrieren mit menschlichem Einfluss geht. Die Präzision bei technischen Einflüssen steht eher im Hintergrund, beispielsweise wurden bei Bremsungen schlechte Bedingungen in der Eisenbahninfrastruktur, also rutsch-

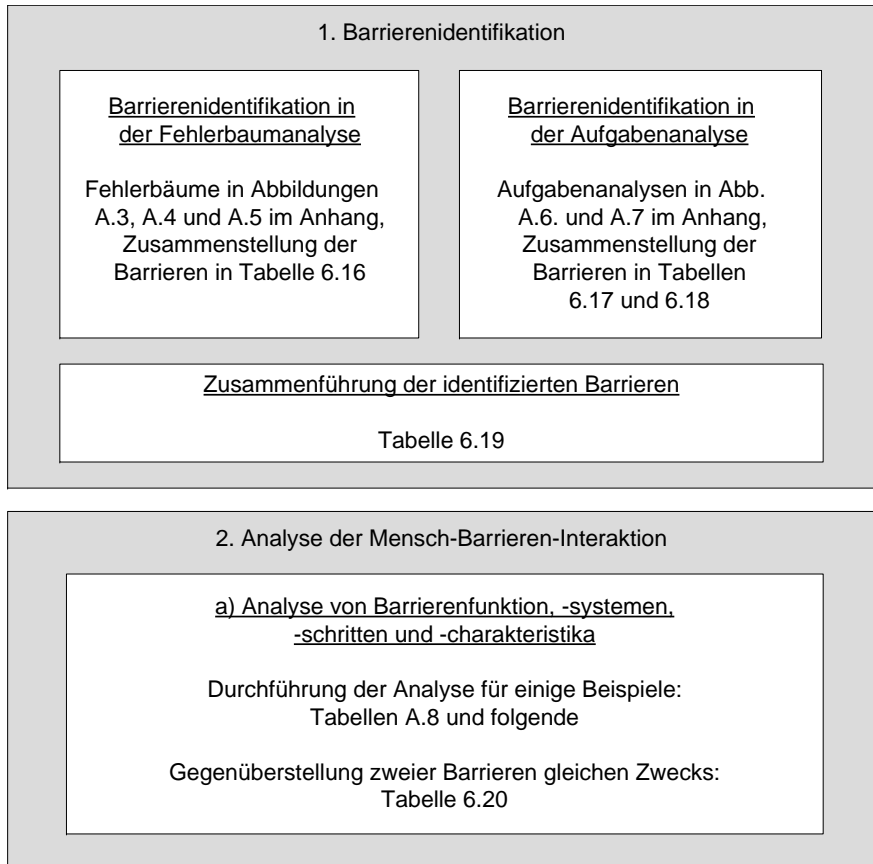


Abbildung 6.13: Ablauf des Beispiels und zugehörige Tabellen und Abbildungen

-
- Zu schnelles Fahren auf freier Strecke:
 - I. Triebfahrzeugführer stellt eine zu hohe Geschwindigkeit ein
 - Zusammenprall am Bahnübergang
 - II. Akustische Warnung der Straßenverkehrsteilnehmer
 - III. Bremsung des Zuges nach Wahrnehmung des Hindernisses durch den Triebfahrzeugführer
 - Überfahren eines Halt zeigenden Signals (z.B. eines Blocksignals)
 - IV. Triebfahrzeugführer missachtet Halt zeigendes Signal
 - V. Triebfahrzeugführer missachtet Halt erwarten zeigendes Vorsignal
 - VI. Triebfahrzeugführer löst sich aus der PZB-Bremskurve durch Drücken von *PZB Frei*
 - VII. Triebfahrzeugführer unterdrückt Zwangsbremsung am Hauptsignal durch *PZB Befehl*
-

Tabelle 6.16: Aus der Fehlerbaumanalyse identifizierte Barrieren

ge Schienen, weggelassen. Auch wenn in den Beispielen nur die Handlungen der Triebfahrzeugführer markiert sind, so verbergen sich doch auch hinter technischen Basiselementen menschliche Einflüsse, z.B. bei der Wartung der Bremsen, der Einstellung der Brems Hundertstel usw., sie entstehen jedoch nicht im Moment des Betriebs. Bei den Beispielen treten innerhalb der Fehlerbaumanalysen grundlegende Funktionen der PZB in Dreifrequenzbauart auf, zugehörige Erläuterungen sind z.B. in [27] oder [50] zu finden. Die aus der Fehlerbaumanalyse identifizierten Barrieren mit menschlichem Einfluss sind in Tabelle 6.16 aufgelistet.

Der zweite Schritt dieser Komponente umfasst die Identifikation von sicherheitsrelevanten Tätigkeiten (Sicherheitsfunktionen), aus denen Barrieren abgeleitet werden können, mithilfe einer Aufgabenanalyse. In dieser Analyse kann durch eine Entmischung von parallelen und seriellen Aufgaben ein Gewinn an Klarheit erreicht werden.

Allgemeine Tätigkeiten, die der Lokführer sowohl bei Ein- oder Ausfahrt in oder aus Bahnhöfen als auch bei Fahrt auf freier Strecke zu erledigen hat, werden in der hier gezeigten Aufgabenanalyse aus den Einzelbetrachtungen herausgelöst und in einem separaten Zweig der Baumstruktur abgelegt. Dies hat den Vorteil, dass diese Tätigkeiten nicht mehrmals auftreten und mehrfach betrachtet werden müssten. Ein

möglicher Nachteil ist der fehlende, direkte Blick auf sämtliche, parallele Tätigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Diese Aufgabenanalyse ist in Abbildung A.6 im Anhang dargestellt. Die Tätigkeiten im Zweig *Allgemeine Aufgaben* sind bereits nach dem Kriterium eingefärbt, ob es sich um eine Tätigkeit mit Sicherheitsfunktion (gelb) oder mit Leistungsfunktion (grün) handelt. Eine Tätigkeit besitzt wie bereits in Kapitel 5.3 erläutert genau dann eine Sicherheitsfunktion, wenn das Ausbleiben oder eine fehlerhafte Ausführung dieser Handlung eine Gefährdung oder Risiken nach sich zieht oder die Tätigkeit Teil einer anderen Funktion mit Sicherheitsrelevanz ist. Am Rande sei zur Erklärung angemerkt, dass die Betätigung der SIFA durch den menschlichen Bediener eine Leistungsfunktion repräsentiert, da das Betätigen die Weiterfahrt des Zuges ohne Zwangsbremung ermöglicht und die fehlerhafte Ausführung nicht unmittelbar eine Gefährdung bedeutet. Diese grobe, hierarchische Aufgabenanalyse (HTA) für Triebfahrzeugführer zeigt zum einen die Ausgliederung allgemeiner Tätigkeiten und zum anderen wie sich die Tätigkeiten der folgenden Detailanalyse in der Aufgabenstruktur des Triebfahrzeugführers wiederfinden.

Für die Demonstration der Barrierenidentifikation wird der Schwerpunkt auf das *Fahren auf freier Strecke* gelegt, da dieser Ast die drei eingangs genannten Szenarien umfasst. Die Aufgabenanalyse für diesen Ast ist in Abbildung A.7 im Anhang zu sehen. Hier sind ebenso die Tätigkeiten auf der untersten Ebene farblich nach Leistungsfunktion (grün) und Sicherheitsfunktion (gelb) gekennzeichnet.

Aus den Tätigkeiten mit Sicherheitsfunktionen kann mit der Maßgabe, dass zu beachtende Merkmale in eine erste Spalte und auszuführende Tätigkeiten in eine zweite Spalte zu sortieren sind, die Tabelle 6.17 erstellt werden. Eine Zeile der Tabelle entspricht einer identifizierten Barriere. Auszuführende Handlungen stehen für umzusetzende *Barrierenfunktionen*, zu beachtende Merkmale repräsentieren in der Regel *Barrierensysteme*. Im Beispiel ist das nur für das Beobachten des Bahnübergangs nicht der Fall: wenn sich Hindernisse auf dem Bahnübergang befinden, sind sie dort nicht als Barriersystem installiert. Es handelt sich also im Gegensatz zu den anderen Barrieren, die den symbolischen Barrieren zuzurechnen sind, um eine immaterielle Barriere. Zugehöriges Barriersystem ist die Regel, den Bahnübergang zu beobachten und bei Hindernissen eine Schnellbremsung einzuleiten.

Bei Tätigkeiten mit Leistungsfunktion muss gefragt werden, ob durch die Ausführung der Tätigkeit eine bereits aktive, technische Sicherheitsvorkehrung außer Kraft gesetzt wird oder eine solche Vorkehrung durch eine bestimmte, evtl. fehlerhafte Bedienung oder Unterlassung initiiert wird. Es handelt sich um funktionale Barrieren. Das Ergebnis für das Beispiel ist in Tabelle 6.18 zusammengestellt.

Nr.	Zu beachtende Merkmale (überwiegend Barrierensysteme)	Auszuführende Sicherheits- funktion (Barrierenfunktion)
1	<ul style="list-style-type: none"> • EBUa beachten • Hektometertafeln beachten • Tacho beachten 	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit regeln
2	<ul style="list-style-type: none"> • Signalbegriff des Blockvorsignals beachten 	<ul style="list-style-type: none"> • Eventuell bremsen
3	<ul style="list-style-type: none"> • Signalbegriff des Blocksignals beachten 	<ul style="list-style-type: none"> • Eventuell zum Halt bremsen
4	<ul style="list-style-type: none"> • Pfeiftafel beachten 	<ul style="list-style-type: none"> • Pfeife betätigen
5	<ul style="list-style-type: none"> • BÜ beobachten 	<ul style="list-style-type: none"> • Eventuell bremsen

Tabelle 6.17: Aus Tätigkeiten mit Sicherheitsfunktion abgeleitete Barrierensysteme und -funktionen

In der dritten Phase der Komponente *Barrierenidentifizierung* werden die Barrieren aus den Sicherheits-/Barrierenfunktionen aus den Phasen 1 und 2 zusammengeführt, siehe Tabelle 6.19. Einige Barrieren sind dabei mit beiden Verfahren identifiziert worden. Doppelte Exemplare können entfallen. Die Bezeichnung der Barrieren wurde dabei aus den Sicherheitsfunktionen aus den beiden Verfahren abgeleitet und es wurde eine substantivische Formulierung verwendet. Es konnten nicht nur die Barrieren aus dem Fehlerbaum abgeleitet werden, sondern zusätzliche, aufgabenbezogene Barrieren gefunden werden – die aus technischer Sicht zu anderen betrieblichen Komponenten gehören.

An diesem Punkt der Analyse sind die Barrieren mit menschlichem Einfluss identifiziert und in einer Liste dokumentiert. Der zweite Analyseschritt, der in diesem Beispiel gezeigt werden soll, ist die *Analyse von Barrierenfunktion, -systemen, -schritten und -charakteristika*. Es handelt sich um die Komponente 2a) aus dem Ablaufdiagramm der Methode weiter vorn.

Nr.	Auszuführende Handlung	Deaktivierte Sicherheitsfunktion
6	<ul style="list-style-type: none"> • Evtl. „PZB frei“ drücken 	<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung der PZB-Bremskurve
Nr.	Auszuführende Handlung	Bei fehlerhafter Ausführung ange- stoßene Sicherheitsfunktion
7	<ul style="list-style-type: none"> • „PZB Wachsam“ drücken 	<ul style="list-style-type: none"> • PZB-Zwangsbremmung (bei Unterlassung)

Tabelle 6.18: Aus Tätigkeiten mit Leistungsfunktion abgeleitete Barrierensysteme und -funktionen

Die als erstes abzuarbeitenden Punkte sind die Kategorisierungen der Barrieren nach ihrer Eigenschaft funktional/ symbolisch/ immateriell, nach Barrierentypen (A, B, C) und Barrierenarten (A/B, C1/C2, C3/C4). Ein Teil dieser Einteilungen ist in Tabelle 6.19 bereits eingetragen. Für die Kategorisierung symbolisch/immateriell wurden die zu beachtenden Merkmale aus der Aufgabenanalyse aus Tabelle 6.17 und die Definitionen aus Kapitel 5 herangezogen. Die restlichen Barrieren sind als funktional zu klassifizieren, wenn die Sicherheitsfunktion primär vom technischen System übernommen wird.

In diesem Beispiel wird die qualitative Analyse gemäß der Komponente 2a) der Methode für einen Großteil der Barrieren weitergeführt, um die Tauglichkeit des Verfahrens für alle Barrierenarten zu demonstrieren. Aussagen zum Vergleich von Barrieren lassen sich mit den Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion in optimaler Weise für Barrieren der Art A/B treffen.

Eine vollständige, qualitative Analyse, die den Schritten und Kriterien aus dem vorherigen Unterkapitel folgt, wurde für die Barrieren Nr. 1 sowie 4 bis 7 durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Barriere abgebildet (ähnlich zu Nr. 2), ein *Langsamfahrt erwarten* zeigendes Vorsignal, um die Überlagerung einer aktiven und einer passiven Initiierung zu modellieren. Die entsprechenden Ergebnistabellen aller Barrieren sind aufgrund ihrer Größe im Anhang zu finden, Tabellen A.8 und folgende ab

Nr. aus Schritt 1	Nr. aus Schritt 2	Barriere	Typ
I	1	Einhaltung der Streckenhöchstgeschwindigkeit auf freier Strecke	symbolisch (A)
V	2	Bremmung nach „Halt erwarten“ zeigendem Blockvorsignal	symbolisch (A)
IV	3	Bremmung zum Halt vor „Halt“ zeigendem Blocksignal	symbolisch (A)
II	4	Akustische Warnung für Straßenverkehrsteilnehmer durch Pfeifen vor einem Bahnübergang	symbolisch (A)
III	5	Bremmung bei Erkennung von Hindernissen auf einem Bahnübergang	immateriell (A)
VI	6	Überwachung der Bremskurve durch die PZB	funktional (C)
VII		Zwangsbremmung durch die PZB bei Vorbeifahrt am Halt zeigenden Hauptsignal	funktional (C)
	7	Zwangsbremmung durch die PZB bei Unterlassung des Drückens von <i>PZB Wachsam</i>	funktional (C)

Tabelle 6.19: Zusammenstellung der identifizierten Barrieren, Kategorisierung nach Barrierentyp und -art

Seite 226. Die Tabellen zeigen die Ausprägungen und Charakteristika jeder Barriere in übersichtlicher Form. Der Schritt 2a) der Methode ist damit abgeschlossen. Die in diesem Schritt erzielten Ergebnisse bilden die direkte Grundlage für den Vergleich verschiedener Barrieren, der in vielen Anwendungsfällen von Interesse ist.

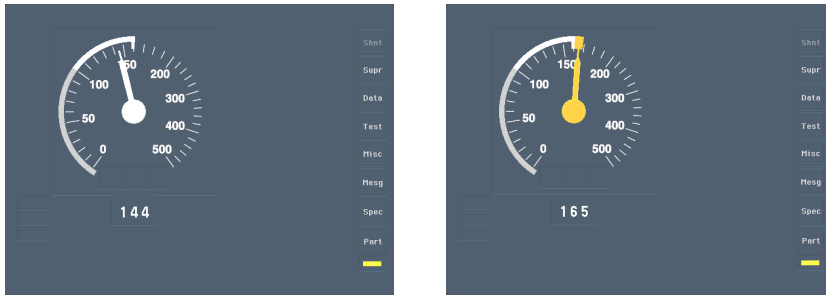


Abbildung 6.14: ETCS Driver Machine Interface bei Fahrt unterhalb der Höchstgeschwindigkeit (links) und bei Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit (rechts), aus [104]

Ein Vergleich der Barrieren hinsichtlich ihrer Fehleranfälligkeit kann anhand der in den Tabellen eingetragenen Charakteristika und Ausprägungen bei verschiedenen Kriterien erfolgen. Eine Gegenüberstellung ist besonders augenfällig, wenn die Barrieren einem ähnlichen Zweck dienen. Daher soll an dieser Stelle eine weitere Barriere gegen das Überschreiten einer Höchstgeschwindigkeit erläutert und in das Beispiel eingebracht werden. Die neue Barriere soll dann dem Einhalten der Streckengeschwindigkeit unter PZB gegenübergestellt werden. Bei Fahrt unter dem europäischen Zugsicherungssystem ETCS wird dem Triebfahrzeugführer ein Tacho dargestellt, in dem der Zeiger seine Farbe in orange ändert, sobald eine zu hohe Geschwindigkeit gefahren wird (Abbildung 6.14). Es handelt sich um eine Barriere mit lediglich *einem* symbolischen Barriersystem, das den Bediener aktiv initiiert. Bei Änderung der Farbe ist die Geschwindigkeit überschritten und der Triebfahrzeugführer soll sofort abbremesen. Auch für dieses Beispiel wurde eine qualitative Analyse durchgeführt, die in Tabelle A.14 im Anhang zu finden ist.

Vergleicht man nun die Barrieren zum Einhalten der Streckengeschwindigkeit unter PZB und ETCS, ist festzustellen, dass die Einhaltung unter ETCS wesentlich weniger komplex ist, da die Überschreitung hier direkt im Tacho angezeigt wird. Für den Vergleich werden im einzelnen die folgenden Kriterien herangezogen, da es sich bei beiden Barrieren um den Typ A handelt:

- aktive gegenüber passive Initiierung
- Anzahl der Barrierensysteme
- automatisierter gegenüber nicht automatisierter Durchlauf der kognitiven Informationsverarbeitungsschleife
- Zeitverfügbarkeit

Ein Teil der Kriterien wird dabei zusammengezogen. Außerdem kommen räumliche und zeitliche Nähe von Barrierensystemen sowie Komplexität bei denselben Sinneskanal verwendenden Barrierensystemen als Kriterien hinzu. Der Vergleich der beiden Barrieren gegen das zu schnelle Fahren unter unterschiedlichen Zugssicherungssystemen ist im einzelnen in Tabelle 6.20 dargestellt. Höhere Werte stehen in der Übersicht für eine höhere Komplexität der Mensch-Maschine-Interaktion zur Herstellung der Sicherheitsfunktion. In fast allen Kriterien ist die initiiierende und einzelne Anzeige des ETCS-Driver-Machine-Interface besser geeignet als das Zusammenziehen von Informationen aus Hektometertafeln, EBuLa und Tacho bei Fahrt mit PZB.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in diesem Beispiel aufgrund der geringeren Komplexität der Variante der Sicherheitsvorkehrung unter ETCS eindeutig der Vorzug zu geben wäre. Es ist davon auszugehen, dass die neue Technologie dieses Subsystems mindestens die gleiche Sicherheit aufweist wie das Altsystem.

Anhand mehrerer Szenarien wurde in diesem Kapitel zunächst die Barrierenidentifikation demonstriert. Mit dem dualen Verfahren gelingt ein ganzheitlicher Blick auf menschliche Handlungen und Sicherheitsfunktionen. Die Identifikation ist mit Tabellen und Abbildungen hinterlegt, sodass der Anwender den Entstehungsgang nachvollziehen kann.

Für einen Großteil der Beispiele wurde die qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion zu Ende geführt. Die Tabellen der Barrierensysteme und -charakteristika zeigen, dass die qualitative Analyse einer Barriere mit den entwickelten Modellen und Klassifikationen gelingt. Dabei werden unterschiedliche Beschreibungen erzielt, die schließlich einen Vergleich verschiedener Sicherheitsvorkehrungen und ihrer Ausprägungen ermöglichen. Mit diesen Beispielen konnten bereits einige typische Barrieren des Eisenbahnverkehrs, speziell des Arbeitssystems des Triebfahrzeugführers, beschrieben werden. Im Anwendungsfall sind die qualitativen Aussagen noch um die Umgebungsfaktoren zu ergänzen. Dabei helfen die Arbeitssystem-Modelle und die Auswahl von *performance shaping factors* aus Kapitel 4.

Kriterien	Barriere	
	unter PZB	unter ETCS
Anzahl Barrierensysteme	3	1
davon nicht-initiierend	3	1
davon mit nicht-automatisierten Durchläufen während der Initiierung	3	0 oder 1
Zur Verfügung stehende Zeit	○	○
räumliche Nähe zwischen Barrierensystemen	—	k.A.
zeitliche Nähe zwischen Barrierensystemen	○	k.A.
Anzahl denselben Sinneskanal verwendende Barrierensysteme	3	1

Tabelle 6.20: Gegenüberstellung von Barrieren gegen zu hohe Geschwindigkeiten auf freier Strecke

Die Aussagen aus der Methodik können bereits zum Vergleich verschiedener Sicherheitsvorkehrungen herangezogen werden. Barrieren, bei denen Menschen einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktion haben, können künftig auf Ordinalskala bewertet werden. Mit anderen Worten, es werden Aussagen bezüglich der Fehleranfälligkeit bestimmter Sicherheitsfunktionen mit menschlicher Mitwirkungen möglich. Die hier entwickelte, qualitative Analyse­methode kann in günstiger Weise für RAMS-Analysen herangezogen werden, um menschliche Einflussfaktoren in der Weise zu berücksichtigen, wie es von DIN EN 50126-1 vorgeschrieben ist.

7 Weiterentwicklungen, Ergebnisse und Ausblick

Diese Arbeit hat neue Erkenntnisse für die Einbeziehung menschlicher Einflussfaktoren in Verlässlichkeits- und speziell Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr geliefert und eine Methode zur qualitativen Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit entwickelt. Dieses Kapitel beginnt mit einer Vorschau auf eine mögliche Weiterentwicklung der Methodik zur semi-quantitativen Bewertung der menschlichen Fehleranfälligkeit. Der zweite Abschnitt dieses Kapitels widmet sich dem generellen Rückblick auf die Ergebnisse der Arbeit und gibt ein abschließendes Resümee. Des Weiteren werden einige grundsätzliche Perspektiven im Bereich der Forschung zu menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem aufgezeigt.

7.1 Ausblick auf eine Weiterentwicklung zur semi-quantitativen Bewertung

Die Analytik, die im vorherigen Kapitel erläutert wurde, ist in der Lage, die Mensch-Maschine-Interaktion, mit der es zur Ausführung oder zum Ausbleiben der Sicherheitsfunktion kommt, qualitativ präzise abzubilden. Dabei wurde zwischen den Barrierentypen A, B und C differenziert, bei denen unterschiedliche Aktionen im Mensch-Maschine-System die Sicherheitsfunktion leisten. Des Weiteren wurden die Barrierenarten A/B, C1 und C3/C4 beschrieben. Sie unterscheiden sich in der Art und Weise, wie die Sicherheitsfunktion zustandekommt und welche Sicherheitsrelevanz Abweichungen von dem vorgegebenen Prozess besitzen.

Die Fehleranfälligkeit der Barrierenart C3/C4 muss von Fall zu Fall eingeschätzt werden. Bei Barrierenart C1 hat eine Abweichung lediglich den Anstoß einer Sicherheitsfunktion zur Folge. Die wichtigste, verbleibende Barrierenart ist die Gruppe der Typen A und B, da es hier bei Ausbleiben der Barrierenfunktion direkt zu einem Sicherheitsrisiko kommt. Im Folgenden werden Weiterentwicklungen der Methode zur Barrierenart A/B analysiert, auch vor dem Hintergrund, dass bei C1 ein ähnlicher Ablauf stattfindet, jedoch nicht mit Sicherheits- sondern mit Leistungsfunktion. Die Aussagen zu A/B lassen sich also indirekt auf die Barrierenart C1 übertragen.

Im Kapitel 6.3 konnten Kriterien für die Komplexität von Barrieren der Typen A und B zusammengestellt werden. Dabei wurden im Fokus die Barrierensysteme analysiert, die im wesentlichen bei der Barriereninitiiierung eine Rolle spielen. Eine mögliche Erweiterung der Methodik bietet sich hier durch die Kriterien der Systemergonomie [20]. Die Dimensionalität, also wie viele Freiheitsgrade der Bediener für die Bewältigung einer Aufgabe hat, hat sicher in erster Linie Einfluss auf die Komplexität der *Barrierenausführung*.

Für die Weiterentwicklung der Analyse zu einer semi-quantitativen Bewertung muss mindestens eine Klasseneinteilung oder einer Skala mit Punktesystem geschaffen werden. Später müssen die Klassen mit Intervallen hinterlegt werden. Die bereits eingeführten Kriterien und die erläuterte, qualitative Analyse ermöglichen lediglich vergleichende Aussagen auf Ordinalskala, z.B. $a > b$. Durch eine Einteilung in Klassen im ersten Schritt bleibt die Aussage zwar qualitativ, es werden jedoch auch Bewertungen wie z.B. $a \gg b$ möglich.

Für eine solche Weiterentwicklung dienen die bereits erläuterten vier Kriterien als Grundlage: Anzahl der Barrierensysteme, Art des Durchlaufs der kognitiven Verarbeitungsschleife, Art der Initiierung und zur Verfügung stehende Zeit. Da mit der Anzahl der Barrierensysteme auch die Anzahl der Durchläufe der Verarbeitungsschleife ansteigt, soll dieses Kriterium mit dem zweiten Kriterium zusammengefasst werden. Gewertet werden alle nicht automatisierten Durchläufe während der Barriereninitiiierung. Bei einem sehr leicht verständlichen und einzigen Barrierensystem in einer Barriere kann also beispielsweise der Wert 0 auftreten, wenn die menschliche Informationsverarbeitung allein durch den Durchlauf während der Barrierenverarbeitung abgedeckt ist.

Mit den verbleibenden drei Dimensionen lässt sich eine Bewertungstabelle wie Tabelle 7.1 zusammenstellen. Enthalten ist eine Klasseneinteilung für die Fehleranfälligkeit einer Barriere des Typs A oder B, je höher der Wert, desto höher die Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler. In dieser Variante wird die Barriere *Pfeiftafel* auf der Skala mit einer 1 bewertet (aktive Initiierung und einziges Barrierensystem sowie kein nicht automatisierter Durchlauf der Informationsverarbeitungsschleife während der Barriereninitiiierung wegen ihres häufigen Auftretens auf Nebenbahnen). Die Barriere gegen zu schnelles Fahren auf freier Strecke besitzt hingegen drei Barrierensysteme (drei Durchläufe) und hat eine passive Initiierung. Die Bewertung läge bei dem Wert 5. Durch diese Analyse kann festgestellt werden, dass die Aufgabe der Einhaltung der Streckengeschwindigkeit komplexer und fehleranfälliger ist als das Betätigen der Pfeife vor einem Bahnübergang. Es ist zu

		Keine Zeitknappheit		Zeitknappheit	
		Aktive Initiierung	Passive Initiierung	Aktive Initiierung	Passive Initiierung
		B1/C1/ B3/C3	B2/C2/ B4/C4	B1/C1/ B3/C3	B2/C2/ B4/C4
Nicht automa-	0	1	2	3	4
tisierte Durch-	1	2	3	4	5
läufe in der	2	3	4	5	6
Barriereninit.	>2	4	5	6	7

Tabelle 7.1: Variante für eine semi-quantitative Bewertung der Fehleranfälligkeit der Barrieren des Typs A und B auf Basis der Kriterien der Mensch-Barrieren-Interaktion

beachten, dass diese Basiswahrscheinlichkeiten in jedem Fall noch mit leistungsbeflussenden Faktoren auf die spezielle Situation anzupassen sind.

Mit diesem Analyseverfahren lassen sich ebenso die Einhaltung einer Höchstgeschwindigkeit auf Strecken mit PZB-Ausrüstung und bei Fahrt unter ETCS Level 2 vergleichen. Wie bereits bei den Beispielen im vorherigen Kapitel geschildert, handelt es sich im ersten Fall um eine symbolische Barriere mit drei Barrierensystemen, passiver Initiierung und einer relativ hohen Komplexität. Gemäß der Tabelle zur semi-quantitativen Einschätzung würde der Wert 5 abgelesen. Das Einhalten der Höchstgeschwindigkeit unter ETCS weist eine geringere Fehleranfälligkeit auf, da die Überschreitung hier direkt im Tacho angezeigt wird. Es handelt sich um eine Barriere mit lediglich einem symbolischen Barrierensystem, das den Bediener aktiv initiiert. Je nach Bewertung des Durchlaufs der Informationsverarbeitungsschleife würde diese Barriere in der semi-quantitativen Bewertung einen Wert 0 oder 1 erhalten, der Wert wäre jedoch deutlich geringer als die Einschätzung bei Fahrt unter PZB. Mit diesem Beispiel wird noch einmal deutlich, dass die in dieser Arbeit entwickelte Methode sich bereits dazu eignet, verschiedene Ausprägungen von Sicherheitsvorkehrungen gegen ähnliche Risiken zu vergleichen. An diesem Beispiel wird vielmehr verdeutlicht, dass die Einführung einer Klasseneinteilung auch die Herausarbeitung eines verhältnismäßig großen Abstands zwischen der Fehleranfälligkeit der Geschwindigkeitsbeachtung unter PZB und ETCS Level 2 möglich

macht. Die Einführung von semi-quantitativen Angaben ist also sehr vorteilhaft, um die Wertigkeit der mit der Mensch-Barrieren-Interaktion erzielbaren Aussagen zu steigern. Die Erstellung der entsprechenden Grundlagen ist jedoch recht aufwändig, wie die folgenden Absätze wiedergeben.

Bei den qualitativen Aussagen der Kriterien handelt es sich um aus der Literatur bekannte Schwierigkeitsgrade, von deren Richtigkeit prinzipiell ausgegangen werden kann. Die Einteilung in Klassen nach Tabelle 7.1 ordnet erstens die Komplexität auf einer linearen Skala an, die noch validiert werden muss. Ein weiterer Durchlauf durch die Informationsverarbeitungsschleife könnte die Komplexität theoretisch auch progressiv steigern, also z.B. um 2 Punkte. Die Einteilung in Klassen nimmt zweitens eine Kombination der Kriterien vor, deren Gültigkeit auch überprüft werden muss. Es wäre zu belegen, dass eine passive Initiierung gegenüber aktiver Initiierung (im Beispiel 1 Punkt Differenz) die Komplexität in der gleichen Weise wie ein weiterer Durchlauf der Informationsverarbeitungsschleife erhöht. Ebenso muss geprüft werden, ob die Hypothese des automatisierten Durchlaufs bei häufig auftretenden und besonders verständlichen Barrierensystemen korrekt ist. Durch Studien oder durch eine spezielle Literaturanalyse muss der Schwellwert validiert werden.

Für den Einsatz in der Eisenbahnpraxis ist eine Validierung der Klasseneinteilung und später auch der semi-quantitativen Bewertung der Methode eine wichtige Grundlage. Solche Studien, die die erzielten Ergebnisse für Sicherheitsbetrachtungen nochmals untermauern könnten, sind für die Zukunft im Institut für Verkehrssystemtechnik vorgesehen. Gleichzeitig sind sie Gegenstand eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts *System Mensch–Sicherheit modellieren* (smsmod). Bei diesem Projekt, das im Herbst 2010 begonnen wurde, handelt es sich um eine interdisziplinäre Kooperation zur menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr zwischen dem Institut für Arbeitswissenschaft, Lehrstuhl für Arbeits- und Organisationspsychologie, der Universität Kassel, dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig und dem Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR. Ziel des Projekts ist nicht nur eine Validierung, sondern auch die Weiterentwicklung der Methodik in Richtung einer quantitativen Bewertungsskala.

Grundsätzlich wäre eine Überprüfung der entwickelten Methodik (Validierung) über folgende Wege möglich, von denen einige bereits angesprochen wurden:

- Abgleich mit Ereignisdatenbanken

- Messung von Daten im realen Eisenbahnbetrieb
- Messung bei Trainingsfahrten in den Simulatoren der Eisenbahnverkehrsunternehmen
- Befragungen bei den Mitarbeitern (Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter)
- Eigene Studien in Simulationslaboren für den Eisenbahnverkehr
- Experten-Befragungen oder Experten-Ratings

Die Ereignisdatenbanken sind für den deutschen Eisenbahnverkehr im Rahmen dieser Arbeit nicht zugänglich. Daten anderer Staaten heranzuziehen, wäre für den Zweck der Validierung grundsätzlich denkbar. Es muss jedoch gefragt werden, ob die Ereignisdaten eine Präzision aufweisen, die eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Ausprägungen der Mensch-Barrieren-Interaktion ermöglichen.

Messungen im realen Eisenbahnbetrieb oder bei Ausbildungsfahrten bedeuten einen hohen Aufwand, bei denen zusätzlich auch die Anonymisierung erhobener Daten problematisch ist. Auch systematische Befragungen der Mitarbeiter repräsentieren Untersuchungen, die umfangreiche, psychologische Expertise erfordern. Solche Analysen sind aus Platzgründen nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit. Die typische, psychologische Vorgehensweise sieht die Bestätigung oder Widerlegung zuvor aufgestellter Hypothesen vor. Hierfür sind üblicherweise Probandengruppen von mindestens 20 Personen zu empfehlen, um die statistische Signifikanz zu belegen. Zur Komplexitätsreduzierung wäre zu erwägen, exemplarisch nur die wichtigsten Thesen zu bestätigen, jedoch bleibt damit naturgemäß eine Restunsicherheit bei nicht untersuchten Kriterien. Es existieren nur wenige Eisenbahnsimulationslabore im Bereich der Forschung, die sich für psychologische Studien eignen, also reproduzierbare Versuchsbedingungen ermöglichen und über geeignete Datenaufzeichnung verfügen. Die Versuchsumgebung RailSET am Institut für Verkehrssystemtechnik [68] wird bei den Weiterentwicklungen dieser Methodik eine wesentliche Rolle spielen können. Experten-Befragungen, als letzte Alternative zur Validierung, böten neben der Überprüfung der einzelnen Aussagen auch die Möglichkeit zu unabhängigen Aussagen zur Tauglichkeit der gesamten Methodik.

Insgesamt erscheint eine Weiterentwicklung der Methodik sehr vielversprechend. Durch geschickte Reduzierung des Aufwands können künftige Arbeiten mit psychologischen Studien Thesen zu semi-quantitativen Aussagen überprüfen und die Methode voranbringen.

7.2 Ergebnisse der Arbeit und genereller Ausblick

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Arbeit bilanziert und ein genereller Ausblick auf weitere, mögliche Arbeiten gegeben. Die Zusammenstellung der Ergebnisse erfolgt dabei in diesem Abschnitt zweigeteilt. Zu Beginn werden die Resultate für die Integration von Human factors in den (sicherheitlichen) Gestaltungsprozess des Eisenbahnsystems erläutert, im Anschluss wird die entwickelte Analytik für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit diskutiert.

Bei der Gestaltung und Analyse von Komponenten im Eisenbahnsystem konnten die menschlichen Einflussfaktoren bisher nicht in systematischer Weise einbezogen werden, obwohl viele Unfälle menschlichem Versagen zugeschrieben werden und einschlägige Normen diese Vorgehensweise fordern. Diese Arbeit hat mit *Rail human factors* einen neuen interdisziplinären Ansatz vorgeschlagen, um das menschliche Wohlbefinden an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr zu verbessern und die Leistungsfähigkeit und Sicherheit des Verkehrssystems zu gewährleisten. Die systematische Aufarbeitung der Literatur liefert auch eine Grundlage für mögliche anschließende Arbeiten in vielerlei Facetten der Ingenieurpsychologie. Mögliche Themen sind dabei z.B. die Gestaltung der Arbeitsoberflächen und -instrumente, die kognitive Belastung der Mitarbeiter, das richtige Automatisierungsniveau, eine intelligente Gestaltung des Regelwerks usw. Mit der Modellierung des einzelnen Arbeitssystems und des komplexen Interaktionssystems im Eisenbahnverkehr sowie der Strukturierung der leistungsbeeinflussenden Faktoren konnten Werkzeuge für eine sorgfältige qualitative Einbeziehung dieser Phänomene in technische Betrachtungen herausgearbeitet werden. Die Ursache-Wirkungs-Diagramme mit Einflussfaktoren beantworten ganz konkret eine Forderung der Norm DIN EN 50126-1 zur Systemverlässlichkeit und -sicherheit. Es ist das Plädoyer dieser Arbeit, menschliche Handlungen künftig nicht mehr lediglich als unberechenbares und unerwünschtes Systemelement zu verstehen, sondern das menschliche Verhalten ganzheitlich zu betrachten und Abstand von der ausschließlichen, kontinuierlichen Automatisierung, der Absicherung durch technische Systeme oder Ergänzung von Regelwerken zu nehmen.

Mit dieser Arbeit besteht die Basis, bei künftigen Arbeiten im Rahmen von der weiteren Einführung des europäischen Zugbeeinflussungssystems ETCS und internationalen Harmonisierung sowie bei der Öffnung der Märkte die *menschliche Interoperabilität* nicht zu vernachlässigen. Doch auch national sind mit den Ergeb-

nissen dieser Arbeit solidere Aussagen bezüglich des menschlichen Einflusses auf Betrieb und Sicherheit des Eisenbahnverkehrs möglich.

Die letzte Publikation zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr im deutschsprachigen Raum liegt bereits knapp 20 Jahre zurück, sodass wegen der zwischenzeitlich veränderten Bedingungen eine neue Betrachtung geboten erschien. Die Aufarbeitung des Stands der Technik und des Stands der Forschung hat ergeben, dass trotz einiger internationaler Erkenntnisse im Bereich menschlicher Einflussfaktoren zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit insgesamt noch Forschungsbedarf herrscht. Speziell für den Eisenbahnverkehr existierten bislang keine tauglichen Ansätze und die in der Praxis verwendeten Methoden wiesen einige Nachteile auf. Die Schwächen konnten im einzelnen aufgezeigt werden. Das im Kapitel 3 vorgestellte, tabellarische Modell menschlicher Fehler liefert eine systematische Grundlage für künftige Analysen der menschlichen Verhaltensweisen, da es eine ganzheitliche Perspektive aufweist und zuvor bestehende Lücken oder Missverständnisse im Bereich der *Human Reliability Analysis* beseitigt.

Die Analytik der Mensch-Barrieren-Interaktion repräsentiert einen wesentlichen Beitrag in Richtung einer methodischen Grundlage für die zunächst qualitative und künftig quantitative Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit. Durch die Verwendung von dem Sicherheitstechniker vertrauten Begriffen und Phänomenen ist die Methode handhabbar und für die praktische Anwendung in Sicherheitsbetrachtungen im Eisenbahnverkehr geeignet. Die Methode ist gleichwohl eine Neuerung im Bereich der Ingenieurpsychologie bzw. Human Factors. Die Verknüpfung der Barrieren mit Mensch-Maschine-Interaktion ist im Bereich der Forschungen zur menschlichen Zuverlässigkeit bislang noch unbekannt gewesen.

Ein Vorsprung für die Eisenbahnpraxis wurde durch die folgenden Merkmale erreicht:

- Die Methode ermöglicht eine leicht verständliche Analyse und qualitative Beschreibung der menschlichen Zuverlässigkeit in einer bestimmten Situation und in einem bestimmten Mensch-Maschine-System. Die handliche Komplexität und leichte Anwendbarkeit des Verfahrens werden dabei erstens durch das Aufsetzen auf der Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren erreicht. Zweitens ist die Analytik mit anschaulichen Abbildungen hinterlegt, die beschreiben, durch welche Interaktionen im Mensch-Maschine-System eine Sicherheitsfunktion erbracht wird. Drittens wurde auf den Einstieg in kognitionspsychologische Phänomene bewusst verzichtet. Die Methode ist

für den Praktiker ohne psychologisches Fachwissen anwendbar und integriert dennoch die neusten Erkenntnisse der menschlichen Informationsverarbeitung.

- Sicherheitsvorkehrungen im Eisenbahnverkehr, bei denen ein menschlicher Bediener einen Einfluss auf die Erfüllung der Sicherheitsfunktion hat, können künftig mit der Mensch-Barrieren-Interaktion hinsichtlich ihrer Komplexität und ihrer Fehleranfälligkeit bewertet werden. Verschiedene Ausprägungen des Mensch-Maschine-Systems können auf Ordinalskala bewertet werden. Diese Vergleiche ermöglichen qualitative Aussagen zu menschlichen Einflussfaktoren, wie sie von DIN EN 50126-1 gefordert sind. Die Schritte des Verfahrens wurden in den Kapiteln 5 und 6 beschrieben. Insbesondere für die Barrierenart A/B konnte ein Satz von Kriterien zusammengestellt werden, der eine vergleichende Bewertung ermöglicht. Der Vergleich *dieser* Barrieren ist wegen des Ausbleibens der Sicherheitsfunktion bei menschlichen Fehlern besonders wichtig.
- Es wurde eine handliche Menge von leistungsbeeinflussenden Faktoren zusammengetragen, die für die Tätigkeiten von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern wesentlich sind. Die Darstellung als Ursache-Wirkungs-Diagramm kann im Anwendungsfall in Verlässlichkeitsbetrachtungen genutzt werden.
- Im Rahmen des Abgleichs der Mensch-Barrieren-Interaktion mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler konnten die sicherheitsrelevanten Fehler in Abhängigkeit von der Barrierenart herausgearbeitet werden. Durch diese sicherheitsbezogene Fokussierung konnte die Komplexität der anschließenden Bewertung reduziert werden.
- Die Frage der Aufgabenerfüllung wird schließlich auf der Mensch-Maschine-Ebene in den beiden Kategorien *richtig* oder *falsch* bewertet. Diese Reduktion ist für die Weiterverwendung der Wahrscheinlichkeitsaussagen im Fehlerbaum für die Eisenbahnpraxis zweckmäßig, auch wenn aus Human factors Perspektive eine ganzheitliche bzw. noch differenziertere Betrachtung wünschenswert wäre.
- Einer möglichen, sehr szenarienbasierten oder rein fehlerorientierten Herangehensweise bei der ausschließlichen Nutzung von Fehlerbäumen wird durch die empfohlene Ergänzung durch hierarchische Aufgabenanalysen begegnet. Die HTA leistet nicht nur einen Beitrag zur Barrierenidentifikation, sondern schafft auch beim Anwender das Bewusstsein für das Spektrum menschlicher Handlungen.

Die qualitativen Ergebnisse der Bewertung der Sicherheitsvorkehrungen mit menschlichem Einfluss können künftig Gegenstand von qualitativen Sicherheitsbetrach-

tungen im Eisenbahnverkehr sein. Die Modelle dienen als Beschreibungsmittel, die dem Praktiker künftig als Handwerkszeug zur Verfügung stehen. Hochwertige, qualitative Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit können veraltete Ansätze, wie z.B. die Nutzung der festen Wahrscheinlichkeit 10^{-3} , aus der Praxis verdrängen. Da die in dieser Arbeit vorgestellte, interdisziplinäre Herangehensweise eine deutliche Differenzierung gegenüber bestehenden, klassischen Ansätzen bietet, erscheint eine grundsätzliche Anwendung beim Auftreten von menschlichen Handlungen in sicherheitsrelevanten Teilsystemen des Eisenbahnverkehrs vielversprechend.

Der Forschungshub für die Ingenieurpsychologie und die Mensch-Maschine-Systemtechnik besteht in der Schaffung einer handhabbaren Methode zur vergleichenden Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit. Gegenüber der Komplexität bisheriger HRA-Verfahren ist die leichte Zugänglichkeit durch die Nutzung handlicher Diagramme besonders hervorzuheben. Auf analytischem Wege können künftig verschiedene Barrieren und Mensch-Maschine-Interaktionen bezüglich ihrer Fehleranfälligkeit bewertet werden. In Tabelle 7.2 wird die Mensch-Barrieren-Interaktion mit den in Kapitel 3 aufgestellten Kriterien beurteilt und den bisher existierenden Methoden gegenübergestellt.

Der Vorsprung der Mensch-Barrieren-Interaktion wird im Detail durch folgende Aspekte gekennzeichnet:

- Es wurde eine eigenständige und wenig komplexe Methode zur zunächst qualitativen Analyse von Mensch-Maschine-Systemen entwickelt. Die Interaktionen können in Diagrammform dargestellt werden und die Art und Weise der *Herstellung* oder *Deaktivierung* der Sicherheitsfunktionen ist leicht ersichtlich.
- Eine direkte und pragmatische Ableitung einer Fehleranfälligkeit aus den Informationsübertragungswegen im Mensch-Maschine-System war bisher nicht bekannt. In Ergänzung zu den Aussagen der Systemergonomie, die die Charakteristika der Arbeitsaufgabe in den Fokus setzt, konnte mit dem Barrierenkonzept ein Bezug zur Erfüllung einer Sicherheitsfunktion hergestellt werden.
- Die Arbeit hat Kriterien entwickelt, mit denen sich die Methode in Zukunft zu semi-quantitativen Aussagen weiterentwickeln lässt.
- Die Methode verzichtet auf die explizite Nutzung des Drei-Ebenen-Modells von RASMUSSEN, insbesondere auf die nicht lupenreine Zuordnung von Fehlerwahrscheinlichkeiten zu den verschiedenen Verarbeitungsniveaus.

	HRA- Verf. der 1. Gene- ration	rail- HEI & rail- HEQ	HRA- Verf. der 2. Gene- ration	Mensch- Barrieren- Inter- aktion
Fehleridentifizierung				
• Analytik zur Fehleridentifizierung	○	+	+	○
• Qualität des Informationsverarbeitungsmodells	–	○	+	+
• Unterscheidung von ursachen- und auftretensorientierter Fehlerbetrachtung, Integration von <i>errors of commission</i>	–	–	○ / +	+
• Generische und grafische Kopplung des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine mit der Herstellung der Sicherheitsfunktion	–	–	○	+
Fehlerquantifizierung				
• Methodik zur Quantifizierung	ja	ja	teils	nein
• Qualität der quantitativen Angaben	– / ○	○	○ / +	

	HRA- Verf. der 1. Gene- ration	rail- HEI & rail- HEQ	HRA- Verf. der 2. Gene- ration	Mensch- Barrieren- Inter- aktion
Weitere Kriterien				
• Entwicklung für moderne Arbeitsplätze	–	○	+	+
• Entwicklung speziell für Eisenbahnsysteme	–	+	–	○
• Leichte Erlernbarkeit und Durchführbarkeit	– / ○	– / ○	– / ○	○ / +

Tabelle 7.2: Gegenüberstellung der Mensch-Barrieren-Interaktion und bestehender HRA-Verfahren

- Für die Modellierung menschlicher Informationsverarbeitung wird nicht auf das bei mentalen Tätigkeiten nicht immer zutreffende Modell Wahrnehmen → Entscheiden → Handeln zurückgegriffen. Stattdessen wird das aktuelle und leicht verständliche Modell der kognitiven Informationsverarbeitungsschleife verwendet.
- Für die Bewertung der Fehleranfälligkeit einer Aufgabe oder einer Sicherheitsfunktion wird das Modell der Barrieren verwendet. Auf bereits vorliegenden Erkenntnissen zur Leistung einer Barriere, gestaffelt nach der Abhängigkeit von menschlichen Handlungen (Klassifikation in funktionale, symbolische und immaterielle Barrieren), wird aufgebaut. Mit der Mensch-Barrieren-Interaktion wird eine neuartige Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion nach Art der Erfüllung der Sicherheitsfunktion präsentiert.
- Die in der Sicherheitstechnik bereits bekannte Modellierung von Barrieren wurde um einen Baustein ergänzt. Durch die Entwicklung der Mensch-Barrieren-Interaktion können Barrieren mit menschlichem Einfluss auf die

Sicherheitsfunktion künftig besser hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eingeschätzt werden.

- Mit der Integration der Mensch-Barrieren-Interaktion und dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler ist die Erstellung einer klaren Analytik gelungen, die nicht nur die Einbindung des Menschen in Barrieren beschreibt, sondern auch die Kritikalität im Sinne der Sicherheit berücksichtigt. Die Integration bietet mit den Barrierenarten die Grundlage für sorgfältige Differenzierungen der Art und Weise, wie menschliche Bediener in sicherheitsrelevanten Tätigkeiten eingebunden sind.
- Zwischen ursachen- und auftretensorientierter Betrachtung menschlicher Fehler wird durch Entwicklung und Nutzung des tabellarischen Modells menschlicher Fehler sorgfältig unterschieden.
- Innerhalb der ursachenorientierten Betrachtung wird die Handlungsabsicht in die Analyse einbezogen. Ebenso wird mit der Integration von Auslassungs-, Ausführungsfehlern, absichtlichen und unabsichtlichen Fehlern und *errors of commission* ein sehr großes Spektrum menschlicher Handlungsmöglichkeiten abgedeckt. Aufgrund der Einbeziehung der *errors of commission*, der Einbeziehung der Handlungsabsicht und der analytischen Trennung zwischen ursachen- und auftretensorientierter Betrachtung muss die entwickelte Methode der 2. Generation der HRA-Verfahren zugerechnet werden.

Das Dilemma zwischen der Komplexität menschlichen Verhaltens und der benötigten Reduktion auf richtige oder falsche Ausführung ist nicht einfach zu lösen. Zwischen der psychologischen und der ingenieurtechnischen, sicherheitlichen Perspektive muss ein Kompromiss in der Komplexität gefunden werden. In dieser Arbeit wurde hierfür ein Ansatz entwickelt, der die Eigenschaften des technischen Systems bzw. der Mensch-Maschine-Interaktion bewertet und keinen allzu tiefen Einstieg in die Kognitionspsychologie erfordert. Die Modellierung basiert auf der einfachen Skalierung der Komplexität einer sicherheitsrelevanten Aufgabe zwischen leicht (wenig fehleranfällig) und komplex (eher fehleranfällig). Eine solche Vereinfachung ist als Brücke zwischen den Disziplinen und zur künftigen Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit ein empfehlenswerter Kompromiss.

Mit der entwickelten Methode ist es möglich, die Regeltätigkeiten eines Triebfahrzeugführers zu modellieren und qualitativ zu analysieren. Zu den Fragen der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr, beispielsweise, ob ein Triebfahrzeugführer den Zug stoppt, wenn er über Funk einen mündlichen Haltauftrag bekommt, hat diese Arbeit das Handwerkszeug geliefert. Zu komplexeren Tätigkeiten, insbesondere beim Fahrdienstleiter oder innerhalb der Störungsbetriebs, können

künftige Forschungen auf dieser Arbeit aufbauen. Zur Weiterentwicklung der Methode wurden einige Fragen identifiziert, die Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein können:

- Bei der Überführung der Methode von qualitativen Aussagen zu vollständig semi-quantitativen Angaben sind einige Erweiterungen vorstellbar, die zum Teil bereits im Abschnitt 7.1 angesprochen wurden. Erstens muss die Einteilung der Kriterien in Klassen auf Basis einer Tabelle überprüft werden. Zweitens können die Kriterien noch ergänzt und erweitert werden, hierfür konnten bereits einige bisher sekundäre Kriterien genannt werden. Für semi-quantitative Aussagen muss überprüft werden, zu welchem Grad (Maximalwert) und mit welcher Kritikalität (evtl. progressiver Verlauf) die aufgabenbezogenen Kriterien einen Einfluss auf die Leistung des Mensch-Maschine-Systems haben.
- Für die Weiterentwicklung der Methode erscheint eine Zusammenführung der Mensch-Barrieren-Interaktion, die den Blick auf die Erfüllung der Sicherheitsfunktion legt, mit der Systemergonomie, die die Einbindung des Menschen ins Arbeitssystem analysiert, sehr vielversprechend. Mit beiden Ansätzen gemeinsam könnten die Kriterien der Komplexität (und Fehleranfälligkeit) einer bestimmten Aufgabe auf eine noch solidere Grundlage gestellt und gleichzeitig in der Breite erweitert werden.
- Die Methode liefert aktuell noch keine Hilfestellung zur Anpassung einer erhaltenen Basiswahrscheinlichkeit auf eine bestimmte Situation mit leistungsbeeinflussenden Faktoren (Komponenten b) und c) der Vorgehensweise). Eine Erweiterung in dieser Richtung sollte nicht nur hierfür einen Leitfaden entwickeln, sondern auch den Grad des Einflusses einzelner Faktoren genauer beleuchten. Hierfür kann die Aufarbeitung des Stands der Wissenschaft aus dem Anfang dieser Arbeit als Basis dienen.
- Innerhalb der Mensch-Barrieren-Interaktion wird ein Fokus auf die Aufgabeninitiierung gelegt. Weniger Gewicht der Analyse liegt auf der Komplexität der Verarbeitung (Ableitung eines Handlungsziels) und der Komplexität der Ausführung. Da die Initiierung über die Barrierensystem instrumentalisiert werden kann, ist diese Komplexitätsbewertung praktisch. Es besteht jedoch noch Potential, die Methode um die genauere Bewertung der weiteren Barrierschritte zu erweitern.
- Die Methodik besitzt zum aktuellen Stand Entwicklungsmöglichkeiten bei der Darstellung länger andauernder Barriereninitiierungen und Barrierenausführungen (z.B. Regelung statt Steuerung). Hier erscheinen weitere Forschungen lohnenswert. Dabei ist auch eine Überarbeitung der bestehenden Notation

zu erwägen, die die Reihenfolge verschiedener Barrierenteilschritte präziser abbilden kann. Denkt man an die Verwendung von UML, also der *Unified Modelling Language*, so könnten Maschine, Sensorik und Motorik des Menschen, Entscheidungsmodul und Konzepte-/Erfahrungsspeicher der menschlichen Informationsverarbeitung als Spaltenköpfe eines Sequenzdiagramms dienen.

- Eine der wichtigsten, künftigen Erweiterungen der Methode ist die Weiterentwicklung zu quantitativen Angaben für die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler. Vollends quantitative Daten bereitzustellen, bleibt angesichts der fortbestehenden Komplexität menschlichen Verhaltens und menschlicher Leistungsfähigkeit eine sehr herausfordernde und wegen des hohen Praxiswerts lohnenswerte Aufgabe. Für die Hinterlegung semi-quantitativer Skalen mit quantitativen Angaben bieten sich entweder exemplarische Simulatorstudien oder die sorgfältige Analysen von Ereignisdatenbanken an.
- Denkbar ist ebenso eine Übertragung der Methode auf industrieübergreifende Anwendungen, für z.B. den Luftverkehr, Seeverkehr oder Leitzentren der Energiewirtschaft. Da sich auch dort kaum noch physische Tätigkeiten in den Arbeitssystemen befinden, erscheint ein Transfer prinzipiell möglich.
- Die Methode wurde in erster Linie für die Anwendung durch Eisenbahnpraktiker entworfen, die in der Regel keine kognitionspsychologischen Kenntnisse besitzen. Daher wurde die menschliche Informationsverarbeitung nur mit einfachen Modellen beschrieben. Hier ist langfristig eine Erweiterung denkbar, die die kognitiven Prozesse (in der ursachenorientierten Betrachtung menschlicher Verhaltensmöglichkeiten) in detaillierter Weise abbildet. Eventuell werden hiermit auch erweiterte oder präzisere Aussagen zur Fehleranfälligkeit in den Schritten mit menschlicher Informationsverarbeitung möglich. Für diese Forschungsarbeiten erscheint eine Verknüpfung der Mensch-Barrieren-Interaktion mit dem Konzept der kognitiven Kopplungen vielversprechend [6], [20]. Dabei müsste vermutlich die Skalierung *höher belastend/geringer belastend* im Sinne der kognitiven Kopplungen mit *fehleranfälliger/weniger fehleranfällig* aus der Mensch-Barrieren-Interaktion verknüpft werden.

Ein Großteil der aufgeworfenen Punkte ist Forschungsgegenstand des von der DFG geförderten Projekts *System Mensch–Sicherheit modellieren* (smsmod). Für diese Forschungsarbeiten mag diese Arbeit als Grundlage dienen. Aus der Projektarbeit sind für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit allgemein und für die Tätigkeiten im Eisenbahnverkehr sehr interessante Weiterentwicklungen zu erwarten.

Nach dem Erhalt von quantitativen Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit wird der schließliche, entscheidende Schritt die Anerkennung der Vorgehensweise und der zugehörigen Werte seitens der industriespezifischen Aufsichtsbehörden sein. Mittelfristig wird ihre Einbindung in die Weiterentwicklungen und Validierungsbemühungen empfehlenswert sein, um die erhaltenen Ergebnisse und Wahrscheinlichkeitswerte eines Tages in der täglichen Eisenbahnpraxis in Fehlerbäumen nutzen zu können.

Die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit durch die Mensch-Barrieren-Interaktion ermöglicht vergleichende Aussagen zur Fehleranfälligkeit verschiedener Ausbau- oder Ausprägungsvarianten von Sicherheitsvorkehrungen. Solche Ergebnisse können bereits für Gestaltungsentscheidungen sehr hilfreich sein und einen Beitrag dazu leisten, wirtschaftlich optimierte Lösungen im Gesamtsystem zu erhalten. Die Methode kann zum Beispiel dazu beitragen, dass Barrierensysteme initiiierend statt nicht-initiiierend gestaltet werden, um Entdeckungsfehler zu verhindern. Ein anderer Vorteil würde geschaffen, wenn nicht alle Nachrichten an den Bediener denselben Sinneskanal verwenden. Zur Entlastung des visuellen Sinneskanals am Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers existieren am Institut für Verkehrssystemtechnik Forschungsarbeiten, die den Fahr-/Bremshebel im Führerstand als aktives Stellteil auszulegen versuchen. Durch haptische Informationsübermittlung an den Fahrer können intuitive Bedienkonzepte und Assistenzfunktionen zum energiesparenden Fahren in das Arbeitssystem eingebracht werden.

Die Einbeziehung der menschlichen Faktoren in Gestaltungsprozesse besitzt insgesamt ein großes Potential, die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Eisenbahnsystems zu erhalten und zu verbessern. Der Eisenbahnverkehr muss dem Druck anderer Verkehrsträger durch sichere, attraktive, wirtschaftliche und menschlich angemessene Lösungen begegnen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere im Bereich Human factors mit der europaweiten Harmonisierung und der Öffnung des Eisenbahnmarkts weiterhin spannende Entwicklungen zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- [1] Algedri, J.; Frieling, E.: Human-FMEA. Menschliche Handlungsfehler erkennen und vermeiden. Hanser Verlag, 2001
- [2] Anders, E.: Ein Beitrag zur komplexen Sicherheitsbetrachtung des Bahnsystems, *Signal und Draht* 96 (2004) 6, S. 6-10
- [3] Anders, E.: Ein Beitrag zur ganzheitlichen Sicherheitsbetrachtung des Bahnsystems. Diss. TU Dresden, 2009
- [4] Andersen, T.: Human reliability and railway safety. In: Funnemark, E.; Cojazzi, G.: *Proceedings of the 16th ESReDA seminar on Safety and reliability in transport*. Oslo, 1999, Office for Official Publications for the European Communities, Luxembourg, 2000
- [5] Annett, J.: Hierarchical Task Analysis. In: LeBlanc Dobson, D. (Autor); Hollnagel, E. (Autor und Hrsg.): *Handbook of Cognitive Task Design*, Lawrence Erlbaum Associates, 2003, S. 17-35
- [6] Athanassiou, G.; Günebak, S.; Sträter, O.; Allgaier, S.: „Blick über den Tellerrand“ – Bewertung kritischer Systemleistung mittels Analyse mentaler Anforderungen und Ermittlung des Blickverhaltens von Systemnutzern. In: Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig (Hrsg.): *Rail Automation 2010 – Leistungsuntersuchungen und Spezifikation im Bahnbetrieb*, Braunschweig, 2010
- [7] Bainbridge, L.: Ironies of automation. *Automatica* 19 (1983) 6, S. 775-779
- [8] Balfe, N.; Wilson, J.R.; Sharples, S.; Clarke, T.: Effects of level of signalling automation on workload and performance. *3rd International Conference on Rail Human Factors*, Lille, 2009

- [9] Baysari, M.; Caponecchia, C.; McIntosh, A.: A reliability and usability study of TRACER-RAV: The Technique for the Retrospective Analysis of Cognitive Errors for Rail, Australian Version. *3rd International Conference on Rail Human Factors*, Lille, 2009
- [10] Baysari, M.; Caponecchia, C.; McIntosh, A.; Wilson, J.R.: Classification of errors contributing to rail incidents and accidents: A comparison of two human error identification techniques. *Safety Science* 47 (2009) 7, S. 948-957
- [11] Belmonte, F.: Impact des postes centraux de supervision de trafic ferroviaire sur la sécurité. (Einfluss von Betriebszentralen im Eisenbahnverkehr auf die Sicherheit). Diss. Université de Technologie de Compiègne, 2008
- [12] Belmonte, F.; Boulanger, J.-L.; Schön, W.: Human reliability analysis for automatic train supervision. *10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Human-Machine Systems*, Korea, 2008
- [13] Bepperling, S.-L.: Validierung eines semi-quantitativen Ansatzes zur Risiko-bewertung in der Eisenbahntechnik. Diss. TU Braunschweig, 2008
- [14] Berger, A.: Fahrermodellierung für Schienenfahrzeuge unter Berücksichtigung kognitiver Prozesse im menschlichen Gehirn. Diss. RWTH Aachen. Erschienen als *Fortschrittberichte VDI: Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik*, Nr. 666, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007
- [15] Bock, R.; Diedrich, W.: Mensch-Maschine-Schnittstelle für Betriebsführungssysteme. *Signal und Draht* 85 (1993) 9, S. 268-274
- [16] BOStrab: Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. November 2007 (BGBl. I S. 2569)
- [17] Braband, J.: Risikoanalysen in der Eisenbahn-Automatisierung. Eurailpress, 2005
- [18] Bruder, R.; Helbig, R.; Qiu, J.; Rabenstein, H.; Williams, M.: Studie über die Belastung und Beanspruchung des Zugpersonals bei der DB Regio AG, Teil 1 Belastungsstudie Tf, Kurzfassung, Darmstadt, 2008

- [19] Brünenberg, D.; Enders, H; Gullasch, J.; Hartmann; Six, J.: Risikoanalyse FFB – Ursachen- und Folgenanalyse anhand von Beispielen. *Signal und Draht* 93 (2001) 10, S. 18-25
- [20] Bubb, H.; Sträter, O.: Grundlagen der Gestaltung des Mensch-Maschine-Systems. In: Zimolong, B.; Konradt, U. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich D Praxisgebiete, Serie III Wirtschafts- Organisations- und Arbeitspsychologie, Band 2 Ingenieurpsychologie*, Hogrefe, 2006, S. 143-180
- [21] Bundesamt für Verkehr (BAV) der Schweiz (Hrsg.): Bericht über die Sicherheit im öffentlichen Verkehr 2009. Erhältlich auf <http://www.bav.admin.ch/dokumentation/publikationen/00568/00570/00694/index.html?lang=de>, Letzte Änderung 09.06.2010
- [22] Carey, M.: Integrating Ergonomics into Engineering and Engineering into Ergonomics. In: Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: *People and Rail Systems: Human Factors at the Heart of the Railway*, Ashgate publishing, 2007, S. 501-510
- [23] Chaali-Djelassi, A.; Vanderhaegen, F.; Cacciabue, P.C.; Cassani, M.: Barrier Removal prediction based on a new approach. Application to a degraded train speed procedure. *European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control*. 2007
- [24] Dekker, S.: The re-invention of human error. *Technical Report* Lund University School of Aviation, 2002
- [25] Demitz, J.; Parádi, F.: Höhere Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit durch verhaltensorientierte Ausbildung. *Eisenbahntechnische Rundschau* 58 (2009) 6, S. 316-322
- [26] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 408 *Züge fahren und rangieren*, Stand 13.12.2009, online erhältlich
- [27] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 483 *Zugbeeinflussungsanlagen bedienen – Punktförmige Zugbeeinflussungsanlagen bedienen*, Stand 13.12.2009, online erhältlich

- [28] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Schlussbericht des Projektes ROSA (Rail Optimisation Safety Analysis). Förderkennzeichen BMBF 19S6013. Berlin, 2009
- [29] Dhillon, B.S.: Human Reliability and Error in Transportation Systems. Springer, 2007
- [30] DIN 5566-1 bis -3: Schienenfahrzeuge – Führerräume – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Teil 2: Zusatzanforderungen an Eisenbahnfahrzeuge; Schienenfahrzeuge – Führerräume – Teil 3: Zusatzanforderungen an Nahverkehrs-Schienenfahrzeuge, Beuth-Verlag, 2006
- [31] DIN CLC/TS 50459-1 bis -6: Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Europäisches Leitsystem für den Schienenverkehr – Mensch-Maschine-Schnittstelle – Teil 1: Ergonomische Prinzipien für die Darstellung von ERTMS/ETCS/GSM-R-Informationen; Teil 2: Ergonomische Anordnung der ERTMS/ETCS-Informationen; Teil 3: Ergonomische Anordnung der ERTMS/GSM-R-Informationen; Teil 4: Dateneingabe für die ERTMS/ETCS/GSM-R-Systeme; Teil 5: Symbole; Teil 6: Akustische Informationen, Beuth-Verlag, 2008
- [32] DIN EN 50126-1: Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 1: Grundlegende Anforderungen und genereller Prozess. Beuth-Verlag, 1999
- [33] DIN EN 50128: Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme. Beuth-Verlag, 2001
- [34] DIN EN 50129: Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik. Beuth-Verlag, 2003
- [35] DIN IEC 60300-3-9 (VDE 0050-1:2007-05) Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-9: Anwendungsleitfaden – Risikobeurteilung technischer Systeme, Normentwurf, Beuth-Verlag, 2007

- [36] DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/-elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme (Teile 0 bis 7 mit verschiedenen Ausgabedaten). Beuth-Verlag, 1999-2005
- [37] Dörre, P.: Situationale und personale Bedingungen des Stresserlebens bei Straßenbahn- und Stadtbahnfahrern. Diss. Erfurt, 2001
- [38] Dooley, M.; Hickling, N.; Stephens, P.: Focussed and Effective Human Factors Integration Programmes for Railways. In: Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: *People and Rail Systems: Human Factors at the Heart of the Railway*, Ashgate publishing, 2007, S. 511-516
- [39] Doytchev, D.E.; Swillus, G.: Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: A case study from Bulgaria. *Accident Analysis and Prevention* 41 (2009) S. 1172-1179
- [40] EBO: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), zuletzt geändert durch die Verordnung vom 19. März 2008 (BGBl. I S. 467)
- [41] Elms, D.: Rail safety. *Reliability Engineering and System Safety* 74 (2001) S. 291-297
- [42] Embrey, D.E.; Humphreys, P.; Rosa, E.A.; Kirwan, B.; Rea, K.: SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement. *NUREG/CR-3518* Washington D.C., 1984
- [43] Embrey, D.E.: SHERPA: a systematic human error reduction and prediction approach. *International Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems*, Knoxville, 1986
- [44] Endsley, M.R.; Garland, D.J. (Hrsg.): Situation Awareness : Analysis and Measurement. Erlbaum, Mahwah (New Jersey), 2000
- [45] European Railway Agency (ERA) (Hrsg.): ETCS Driver Machine Interface (Informative Specification) Referenz ERA_ERTMS_015560, Version 3.0 vom 2010-02-19, abgerufen am 2010-03-18

- [46] European Railway Agency (ERA) (Hrsg.): Leitlinie zur Anwendung der Verordnung der Kommission über die Festlegung einer Gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Artikel 6 Absatz 3 Buchstabe a der Eisenbahnsicherheitsrichtlinie, Referenz ERA/GUI/01-2008/SAF, Version 1.1 vom 2009-01-06, abgerufen am 2010-06-07
- [47] EU-Verordnung Nr. 352/2009 der Kommission vom 24. April 2009 über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Artikel 6 Absatz 3 Buchstabe a der Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates [zum Sicherheitsniveau im Schienenverkehr in der EU], ABl. L 108 vom 29.4.2009, S. 4-19
- [48] Feldmann, F.; Hammerl, M.; Schwartz, S.: Questioning human error probabilities in railways. 3rd IET International Conference on System Safety, Birmingham, 2008
- [49] Feldmann, F.; De Filippis, M.: Usability testing for German Railway HMIs: A chance to optimize software engineering. 3rd International Conference on Rail Human Factors, Lille, 2009
- [50] Fenner, W.; Naumann, P.; Trickauf, J.: Bahnsicherungstechnik: Steuern, sichern und überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr. Publicis Publishing, 2. Aufl. 2004
- [51] Ferreira, P.; Clarke, T.; Wilson, J.; Sharples, S.; Ryan, B.: Resilience in rail engineering work. In: Hollnagel, E., Pieri, F.; Rigaud, E. (Hrsg.): *Proceedings of the Third Resilience Engineering Symposium*, 2008-10-28 - 2008-10-30, Antibes – Juan-les-Pins, Frankreich, 2008, S. 83-90
- [52] Fischer, K.; Gasser, R.; Hönger, A.: Entwicklung eines Situation Awareness Trainings für Lokführer. In: Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (Hrsg.): EIK – Eisenbahn Ingenieur Kalender 2010, Verlag Eurailpress, 2009, S. 243-250
- [53] Gibson, W.H.: User trial of the rail-specific HRA technique, Report T270 Phase 3. Rail Safety and Standards Board,
Quelle: http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/T270_rpt_final.pdf Revision 03 vom 2006-07-28 (Dateiversion 2008-12-08)

- [54] Giesa, H.-G.; Timpe, K.-P.: Technisches Versagen und menschliche Zuverlässigkeit: Bewertung der Verlässlichkeit in Mensch-Maschine-Systemen. In: Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T.; Kolrep, H.: *Mensch-Maschine-Systemtechnik – Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. Symposium Publishing, Düsseldorf, 2002, S. 63-106
- [55] Giesa, H.-G.; Timpe, K.-P.: Verlässlichkeit von Mensch-Maschine-Systemen. In: Zimolong, B.; Konradt, U. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich D Praxisgebiete, Serie III Wirtschafts- Organisations- und Arbeitspsychologie, Band 2 Ingenieurpsychologie*, Hogrefe, 2006, S. 603-632
- [56] Gilroy, J.; Grimes, E.: The development and application of a rail human reliability assessment tool. In: Wilson, J. et al.: *People and rail systems – Human factors at the heart of the railway*. Ashgate, 2007, S. 455-464
- [57] Gregory, D.; Shanahan, P. (Autoren); Edmonds, J.(Hrsg.): *Understanding Human Factors – A guide for the railway industry*. Verlag des Rail Safety and Standards Board, 2. Ausgabe, 2008
- [58] Gruber, J.: Die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit des Systems. *ZEV+DET Glasers Annalen* 124 (2000) 2+3, S. 103-108
- [59] Hadj-Mabrouk, H.; Hadj-Mabrouk, A.; Dogui, M.: Sécurité ferroviaire et facteurs humains. Apport de la chronobiologie de la vigilance. (Eisenbahnsicherheit und menschliche Faktoren). Synthèse INRETS Nr. 38, Lavoisier, Cachan, 2001
- [60] Hale, A.; Heijer, T.: Is Resilience Really Necessary? The Case of Railways. In: Hollnagel, E.; Woods, D.; Leveson, N.: *Resilience engineering: concepts and precepts*. Ashgate publishing, 2006, S. 125-147
- [61] Hammerl, M.; Jäger, B.; Lemmer, K.: An integrated model for working environments and rail human factors. In: de Waard, D. et al. (Hrsg.): *Human Factors for assistance and automation*. On the occasion of the Human Factors and Ergonomics Society, Europe Chapter, Annual Conference in Braunschweig, 2007. Maastricht, Shaker Publishing, 2008, S. 415-427

- [62] Hammerl, M.; de Filippis, M.; Feldmann, F.; Meyer zu Hörste, M.: Nutzung arbeitspsychologischer Methoden zur Einschätzung menschlicher Fehler gegenüber dem Regelwerk des Eisenbahnbetriebs. In: Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig (Hrsg.): Rail Automation 2008 – Betriebliche Regelwerke – Einflüsse von Technik und Mensch, Zukunftsperspektiven, S. 123-142, Braunschweig, 2008
- [63] Hammerl, M.; Feldmann, F.: A new structure of performance shaping factors for human reliability in railway applications. Beitrag zur gemeinsamen Konferenz der frz. Arbeitsgruppen GDR E HAMASYT, GDR PSYCHO ERGO, GDR MACS SYSHOMM, *Perception, diagnosis and decisionmaking models applied to transport control and supervision*, Nantes, 2008
- [64] Hammerl, M.; Feldmann, F.: Rail human factors – Menschliche Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem. *ZEVrail Glasers Annalen* 133 (2009) 8, S. 314-321
- [65] Hammerl, M.; Feldmann, F.; Schwartz, S.: Integration menschlicher Zuverlässigkeit in Sicherheitsbetrachtungen. In: Verband Deutscher Eisenbahningenieure e.V. (Hrsg.): EIK – Eisenbahn Ingenieur Kalender 2010, Verlag Eurailpress, 2009, S. 167-176
- [66] Hammerl, M.; de Filippis, M.; Steinhäuser, I.; Torens, C.; Gantz, O.; Meyer zu Hörste, M.; Lemmer, K.: From a testing laboratory for railway technical components to a human factors simulation environment. *3rd International Conference on Rail Human Factors*, Lille, 2009
- [67] Hammerl, M.; Vanderhaegen, F.: Human factors in the railway system safety analysis process. *3rd International Conference on Rail Human Factors*, Lille, 2009
- [68] Hammerl, M.; Feldmann, F.; Rumke, A.; Pelz, M.: Studien zu menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem. *EI – Der Eisenbahningenieur* 61 (2010) 5, S. 46-48
- [69] Hammerl, M.; Talg, M.; Pelz, M.: Towards Assessment of Human Reliability in Railway Applications by Analysis of Human-Barrier-Interaction. *29th European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control* im Kontext des *11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Human-Machine Systems*, Valenciennes, 2010

- [70] Hammerl, M.; Talg, M.; Jellentrup, N.: Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit im Eisenbahnbetrieb. *Eisenbahntechnische Rundschau* 59 (2010) 11, S. 762-766
- [71] Hannaman, G.W.; Spurgin, A.J.; Lukie, Y.: Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis (NUS-4531). Electric Power Research Institute, Palo Alto (Kalifornien), 1984
- [72] Helbling, H.; Weinbeck, T.: Human-FMEA – Failure Mode and Effect Analysis. Diplomarbeit Zürich, 2004. Quelle: [http://www.fmeainfocentre.com/ foreign%20 language/ Human-FMEA.pdf](http://www.fmeainfocentre.com/foreign%20language/Human-FMEA.pdf), abgerufen am 2009-08-31
- [73] Heidl, M.: Bewertung sicherheitlicher Aspekte bei der Einführung von EBUa. *EI – Der Eisenbahningenieur* 54 (2003) 2, S. 46-59
- [74] Heydt, W.: Entwicklung eines Prototyps zur verfahrensgesicherten Steuerung von Hilfsaktionen bei der Bedienung des elektronischen Stellwerks ALISTER, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2007
- [75] Hickling, N.: An Independent Review of a Rail-specific Human Reliability Assessment Technique for Driving Tasks. Report T270. Rail Safety and Standards Board, Quelle: [http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/ T270_review_final.pdf](http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/T270_review_final.pdf) Revision vom 2007-08-14 (Dateiverision vom 2007-11-29).
- [76] Hickling, N.; Gaskell, L.; Clarke, T.: Generic Human Reliability Assessment for Railways: Results. In: Wilson, J. et al.: *People and Rail Systems – Human factors at the Heart of the Railway*, Ashgate, 2007, S. 447-454
- [77] Hinzen, A.: Der Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn. Diss. RWTH Aachen, 1993
- [78] Hockey, B.; Carrigan, N.: Human factors in railway systems: Implications for safety (Report B3 für das Rail Safety and Standards Board), Leeds, 2003
- [79] Hoefl, M.; Oberländer, W.: Bediensysteme für Stellwerke auf Strecken mit geringer Verkehrsdichte. *Signal und Draht* 99 (2007) 4, S. 22-28
- [80] Hollnagel, E.: The phenotype of erroneous actions. *International Journal of Man-Machine Studies* 39 (1993) 1, S. 1-32

- [81] Hollnagel, E.: Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM). Elsevier Science, 1998
- [82] Hollnagel, E.: Barriers and Accident Prevention. Ashgate Publishing, 2004
- [83] Hollnagel, E.; Woods, D.; Leveson, N.: Resilience Engineering: Concepts and Precepts. Ashgate Publishing, 2006
- [84] Hollnagel, E.: Risk + barriers = safety? *Safety Science* 46 (2008) S. 221-229
- [85] Huber, K.: Beanspruchung bei Belastung durch Informationsverarbeitung von DB-Triebfahrzeugführern in unterschiedlichen Einsatzbereichen. Diss. München, 1985
- [86] Hudoklin, A.; Rozman, V.: Reliability of railway traffic personnel. *Reliability Engineering and System Safety* 52 (1996), S. 165-169
- [87] Human factors and Ergonomics Society (Hrsg.): Internetpräsenz <http://www.hfes.org/Web/EducationalResources/HFEdefinitionsmain.html>, abgerufen am 2007-09-10
- [88] HUSARE Projektkonsortium (Hrsg.): HUSARE Project (Human Safe Rail in Europe) – Final Report for Publication, erhältlich über <http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/husare.pdf> Version vom 2000-02-28
- [89] Imperial College, London: Centre for Transport Studies (Hrsg.): Internetpräsenz *A Human Reliability Assessment technique to improve railway safety*. <http://www.cts.cv.ic.ac.uk/html/ResearchActivities/projectDetails.asp?ProjectID=468>, abgerufen am 2010-10-06
- [90] Isaksson-Lutteman, G.; Kauppi, A.; Andersson, A.W.; Sandblad, B.; Erlandsson, M.: Operative tests of a new system for train traffic control. 3rd *International Conference on Rail Human Factors*, Lille, 2009
- [91] Jansson, A.; Olsson, A.; Kecklund, L.: Acting or reacting? A cognitive work analysis approach to the train driver task. In: Wilson, J.R.; Norris, B.J.; Clarke, T.; Mills, A. (Hrsg.): *Rail human factors: supporting the integrated railway*. Ashgate Publishing, London, 2005, S. 40-49

- [92] Johnsen, S.O.; Herrera, I.A.; Vatn, J.; Rosness, R.: Cross-border railway operations: Building safety at cultural interfaces. In: Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: *Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway*, Ashgate Publishing, 2005, S. 393-409
- [93] Jonas, W.: Elektronische Stellwerke bedienen. 1. Aufl. Bahn-Fachverlag. 2003
- [94] Kecklund, L.; Ingre, M.; Kecklund, G.; Söderström, M.; Akerstedt, T.; Lindberg, E.; Jansson, A.; Olsson, E.; Sandblad, B.; Almqvist, P.: The TRAIN-project: Railway safety and the train driver information environment and work situation – A summary of the main results. *2nd Conference on Signalling Safety*, London, 2001.
- [95] Kirwan, B.: The validation of three Human Reliability Quantification Techniques – THERP, HEART and JHEDI. Part 1: Technique descriptions and validation issues. *Applied Ergonomics* 27 (1996) 6, S. 359-373
- [96] Kim, J.; Jung, W.; Jang, S.-C.; Wang, J.-B.: A Case Study for the Selection of a Railway Human Reliability Analysis Method. *16th International Railway Safety Conference*, Dublin, 2006.
- [97] Kim, D.S.; Baek, D.H.; Yoon, W.C.: Development and evaluation of a Computer-Aided System for Analyzing Human Error in Railway Operations. *Reliability Engineering & System Safety* 95 (2010) 2, S. 87-98
- [98] Kluwe, R.: Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung, In: Zimolong, B.; Konradt, U. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich D Praxisgebiete, Serie III Wirtschafts- Organisations- und Arbeitspsychologie, Band 2 Ingenieurpsychologie*, Hogrefe, 2006, S. 35-69
- [99] Leutner, D.; Debus, G.: Psychologische Aspekte der Belastung von Schienenfahrzeugführern im öffentlichen Personennahverkehr und Entwicklung eines simulator-gestützten Belastungs-Reduktions-Trainings. *VDI-Berichte 1219: Simulation und Simulatoren für den Schienenverkehr*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 49-59
- [100] Leutner, D.; Debus, G.; Helmchen, G.; Lohrmann, K.-D.: Bessere Ausbildung dank Technik. *Der Nahverkehr* 17 (1999) 4, S. 36-41
- [101] Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Springer Verlag, Berlin, 1998

- [102] Maag, C.; Schmitz, M.; Fröschl, T.: Psychologie des Eisenbahnverkehrs. In: Krüger, H. P. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Band 2: Anwendungsfelder der Verkehrspsychologie*, Hogrefe-Verlag, 2009, S. 639-710
- [103] Maag, C.; Schmitz, M.: The use of simulator training for train drivers in Europe – an overview and new approaches in 2TRAIN. In: De Waard, D.; Godthelp, J.; Kooi, F.L.; Brookhuis, K. (Hrsg.): *Human Factors – Security and Safety*. Shaker publishing, 2009, S. 89-99
- [104] Maessen, E.J.M.; Rookmaaker, D.P.; Verhoef, L.W.M.; Vorderregger, J.R.: Development of a European solution for the Man-Machine ETCS Interface. Kennziffer A200/M.F5-945222-02.00-950228, Version 2.0 vom 1995-02-28 Online erhältlich auf <http://www.humanefficiency.nl/etcs/articles%20and%20reports/Development%20of%20the%20ETCS%20MMI.pdf>
- [105] McLeod, R.; Walker, G.; Mills, A.: Analysing and modelling train driver performance. In: Wilson, J.R.; Norris, B.J.; Clarke, T.; Mills, A. (Hrsg.): *Rail human factors: supporting the integrated railway*. Ashgate Publishing, London, 2005, S. 70-80
- [106] Metzger, U.; Vorderregger, J.: „Human Factors“ und Ergonomie im ERTMS/ETCS – Einheitliche Anzeige und Bedienung. *Signal und Draht* 96 (2004) 12, S. 35-40
- [107] Metzger, U.; Klos, H.: Der Train Control Simulator (TCSim) der DB Systemtechnik. *EI – Der Eisenbahningenieur* 61 (2010) 8, S. 44-48
- [108] Milius, B.: Konstruktion eines semi-qualitativen Risikographen für das Eisenbahnwesen. Diss. TU Braunschweig, 2009
- [109] Moray, N.: Dougherty's dilemma and the one-sidedness of human reliability analysis (HRA). *Reliability Engineering and System Safety* 29 (1990), S. 337-344
- [110] Mussnug, J.; Neumann, M.; Landau, K.; Wegel, H.; Bestenlehner, S.: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Beurteilung der Arbeitsbelastung von Mitarbeitern in Betriebszentralen der Deutschen Bahn AG. *Bericht zum 47. Arbeitswissenschaftlichen Kongress an der Technischen Universität Kassel, Arbeitsgestaltung - Flexibilisierung - Kompetenzentwicklung*, 2001

- [111] Myrtek, M.; Deutschmann-Janicke, E.; Strohmaier, H.; Zimmermann, W.; Lawrenz, S.; Brügger, G.; Müller, W.: Psychophysiologische Untersuchungen zur Belastung und Beanspruchung bei Fahrdienstleitern, Lokomotivführern und Busfahrern. Forschungsbericht, Freiburg/Breisgau, 1991
- [112] Myrtek, M.; Deutschmann-Janicke, E.; Strohmaier, H.; Zimmermann, W.; Lawrenz, S.; Brügger, G.; Müller, W.: Physical, mental, emotional and subjective workload components in train drivers. *Ergonomics* 37 (1994) 7, S. 1195-1203
- [113] Neumann, M. und Mussnug, J.: Beurteilung der Belastung von Fahrdienstleitern der Deutschen Bahn AG im Rahmen einer Simulatoruntersuchung. *Bericht zum 46. Arbeitswissenschaftlichen Kongress an der Technischen Universität Berlin, Komplexe Arbeitssysteme – Herausforderungen für Analyse und Gestaltung*, 2000
- [114] Nikolay, J. P.: Zur Frage der Beanspruchung von Lokomotivführern während Schnelfahrten bei der Deutschen Bundesbahn. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 1977
- [115] Nuclear Regulatory Commission (Hrsg.): Technical Basis and Implementation Guideline for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA), *NUREG 1624*, Revision 1. Washington, D.C., 2000
- [116] Oed, R.; Müller, B.: Simulationssystem zur Erprobung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Führerstand. *VDI-Berichte 1219: Simulation und Simulatoren für den Schienenverkehr*, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 61-70, 1995
- [117] Olsen, J.; Reinartz, S.; Preumont, J.-P.; Hessami, A.; Brok, M.: Training and Staff Requirements for Railway Staff in Cross-Border-Operations. Atkins, 2002.
- [118] Oster, M.; Sappl, R.; Berger, J.: Ergonomische Bedienoberfläche in Österreich – methodensichere Anzeige im Stellwerk. *Signal und Draht* 99 (2007) 9, S. 27-28
- [119] Pachl, J.: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 5. Aufl., Verlag Vieweg+Teubner, 2008
- [120] Parasuraman, R.; Riley, V.: Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse. *Human factors* 39 (1997) 2, S. 230-253

- [121] Peter, J.-H.: Kann die Sicherheitsfahrschaltung SIFA die Dienstfähigkeit von Triebfahrzeugführern gewährleisten? – Eine psychophysiologische Studie zur Effizienz der SIFA als Vigilanzmonitor und zur Beanspruchung von Fahrzeugführern unter Bedingungen extremer Monotonie, Univ. Marburg, Diss., 1980
- [122] Pflug, T.: Analyse der Potenziale für Assistenzsysteme im Eisenbahnbetrieb. Studienarbeit am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Braunschweig, 2009
- [123] Pickup, L.: Understanding and assessment of mental workload in railway signalling. PhD thesis, University of Nottingham, 2006
- [124] Polet, P.; Vanderhaegen, F.; Wieringa, P.: Theory of safety related violation of system barriers. *Cognition, Technology and Work* 2002 (4) 3, S. 171-179
- [125] Püttner, R.; Geisler, M.: ROSA – Rail Optimisation Safety Analysis. *18th International Railway Safety Conference*, Denver, 2008
- [126] Püttner, R.; Schröder, F.: A pragmatic approach to quantify human action to reduce hazard rates. *19th International Railway Safety Conference*, Bastad, Schweden, 2009
- [127] Qiu, J.; Helbig, R.; Bruder, R.: Analyse der Belastungs-Beanspruchungssituation von Triebfahrzeugführern. In: *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*, 56. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, Tagungsband. GfA-Press, Dortmund, 2010, S. 555-558.
- [128] Quéva, S.: Méthode d’Evaluation de la Réactivité et de l’Adaptabilité humaines dans le Contrôle des Risques. Application à la conduite de transport urbain guidé. (Methode zur Bewertung der menschlichen Reaktions- und Anpassungsfähigkeit zur Integration in den Risikobewertungsprozess. Anwendung auf die Steuerung von Stadtbahnen.) Diss. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2008
- [129] de Raadt, H.: Warum überfahren Lokführer manchmal ein Halt zeigendes Signal? *Signal und Draht* 102 (2010) 7+8, S. 24-28
- [130] Rail Safety and Standards Board (Hrsg.): Tools for train driver mental workload assessment: final report. Part One: Summary of Project. Part Two: Train Driver Workload Tools and Guidance Notes, 2004.

- [131] Rail Safety and Standards Board (Hrsg.): Rail-specific HRA technique for driving tasks – User Manual. Report T270, Rail Safety and Standards Board, 2005, nicht mehr online verfügbar (Dateiversion 2005-04-05)
- [132] Rail Safety and Standards Board (Hrsg.): Rail-specific HRA technique for driving tasks – Final report. Report T270, Rail Safety and Standards Board, 2005, nicht mehr online verfügbar (Dateiversion 2005-04-05)
- [133] Rail Safety and Standards Board (Hrsg.): Human Factors Research Library (Online-Bibliothek zu Human factors Forschung im Eisenbahnverkehr; Nachfolger der vormals als CD-ROM herausgegebenen Sammlungen), Quelle: <http://www.rssbhumanfactorslibrary.co.uk>, abgerufen am 2010-02-23
- [134] Rasmussen, J.: Human Errors – A Taxonomy for describing Human Malfunction in Industrial Installations. *Journal of Occupational Accidents* 4 (1982), S. 311-333
- [135] Reason, J.: Human Error. Cambridge University Press, Cambridge, MA, 1990.
- [136] Reason, J.; Free, R.; Havard, S.; Benson, M.; van Oijen, P.: Railway Accident Investigation Tool (RAIT): A step by step Guide for New Users, Department of Psychology, University of Manchester, 1994
- [137] Reason, J.: Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate publishing, 1997
- [138] Reason, J.; Hollnagel, E.; Paries, J.: Revisiting the „Swiss Cheese“ Model of Accidents. Eurocontrol Report, 2006
- [139] Reer, B.: Conclusions from Occurences by Description of Actions – CODA. In Drottz-Sjöberg, B.M. (Hrsg.): Studies of Risk and Hazard. Annual Meeting of the Society for Risk Analysis Europe, New Risk Frontiers. Center for Risk Research, Stockholm, 1997
- [140] Reer, B.; Dang, V.N.; Hirschberg, S.: The CESA method and its application in a plant-specific pilot study on errors of commission. *Reliability Engineering and System Safety* 83 (2004) 2, S. 187-205

- [141] Reinach, S.; Viale, A.: Application of a human error framework to conduct train accident/incident investigations. *Accident Analysis and Prevention* 38 (2006) 2, S. 396-406
- [142] Rentzsch, M.; Liesemeier, B.; Messerschmidt, W.: Entwicklung modularer Führerstände für Triebfahrzeuge des Regionalverkehrs. *EI – Der Eisenbahningenieur* 53 (2002) 11, S. 34-37
- [143] Rentzsch, M.; Liesemeier, B.; Seliger, D.; Gelbert, L.; Wessner, C.; Meißner, T.; Steinicke, W.; Weigel, T.: Ergonomische Aspekte eines Führerstands für den grenzüberschreitenden Verkehr. *EI – Der Eisenbahningenieur* 57 (2006) 3, S.32-39
- [144] Rookmaaker, D.P.; Verhoef, L.W.M.; Vorderegger, J.R.: A Task Based interface for European train drivers. *Institution of Mechanical Engineers Conference*, Birmingham, 1996
- [145] Rookmaaker, D.P.; Vorderegger, J.R.: Human Interoperability – fact or science fictions? In: IAS Institut für Arbeits- und Sozialhygiene Stiftung (Hrsg.): *Verkehrs- und Arbeitssicherheit in Eisenbahnverkehr – Wege zur Vereinheitlichung*, Mitteilungen 24 des Institutes für Arbeits- und Sozialhygiene, Karlsruhe, 1998, S. 24-28
- [146] Rookmaaker, D.P.; de Bruijn, D.W.; Weeda, C.E.; Koedijk, M.P.H.J.; Zwartenkot, J.L.: Ergonomics relating to the migration of lineside signals to ETCS L2 cab signals. In: Wilson, J.R.; Norris, B.J.; Clarke, T.; Mills, A. (Hrsg.): *Rail human factors: supporting the integrated railway*. Ashgate Publishing, London, 2005, S. 171-181.
- [147] Ryan, B.; Hutchings, J.; Lowe, E.: An analysis of the content of questions and responses in incident investigations: Self reports in the investigation of signals passed at danger (SPADs). *Safety Science* 48 (2010) 3, S. 372-381
- [148] Schäcke, G.; Gossler, K.; Lehl, S.; Nikolay, J.; Schaller, K.H.; Weltle, D.: Untersuchungen zur Beanspruchung des Fahrpersonals bei Schnellfahrten. *Fortschritte der Medizin* 94 (1976) S. 865-870
- [149] Schaffarczik, K.: Das neue flexible Führerraumanzeigesystem in Triebfahrzeugen der DB AG, *Signal und Draht* 93 (2001) 11, S. 12-16
- [150] Schlatter, Hanspeter: Theoretische Überlegungen zum Überfahren haltzeitender Signale. *Signal und Draht* 102 (2010) 3, S.12-14

- [151] Schmidt, A.-L.; Miller, R.: Faktor Mensch und die Sicherheit des grenzüberschreitenden Schienenverkehrs. *Eisenbahntechnische Rundschau* 53 (2004) 12, S. 832-836
- [152] Schmitz, M.; Maag, C. (Hrsg.): Benchmarking report on computer-based railway training in Europe. 2TRAIN Project report. http://www.2train.eu/fileadmin/user_upload/2TRAIN_Benchmarking_Report_on_computer-based_Railway_Training_in_Europe.pdf, abgerufen am 2009-12-03
- [153] Schnell, P.: Die Tätigkeit des Fahrdienstleiters im Mensch-Maschine-System „Fahrdienstleiter - Mechanisches Stellwerk“: ein Beitrag zur quantitativen Analyse mit Hilfe der digitalen Systemsimulation. Forschungsarbeiten des Verkehrswissenschaftlichen Instituts an der Universität Stuttgart, Bericht 11. Univ. Stuttgart, Diss., 1975
- [154] Schröder, F.: Risiko als Funktion der Sicherheitskultur. *Vortrag zum 2. Sicherheitstag des VDEI*, Gotha, 2010
- [155] Schütte, J.; Geisler, M.; Püttner, R.; Schindelhauer, A.: ROSA – ein generisches Sicherheits- und Barrieremodell des Bahnsystems. *EI – Der Eisenbahningenieur* 61 (2010) 8, S. 26-30
- [156] Schwartz, S.; Pelz, M.: MoSiS – Modell der Sicherheits-Schichten im Eisenbahnsystem. Konferenzbeitrag zum 10. *Bieleschweig-Workshop zum Systems Engineering: Modellierung betrieblicher Aspekte & Risikoanalyse*, Braunschweig, 2007
- [157] Schwartz, S.; Hammerl, M.; Feldmann, F.: Quantifizierung menschlicher Fehler für Risikoanalysen. *Signal und Draht* 101 (2009) 6, S. 19-23
- [158] Schwartz, S.: Identifikation von Sicherheitsbarrieren am Bahnübergang *ZEVRail Glasers Annalen* 134 (2010) 1-2, S. 38-44
- [159] Schwier, W.: Modelle des Zusammenwirkens von Mensch und Technik in Systemen zur Zugsicherung. *Eisenbahntechnische Rundschau* 26 (1977) 11, S. 763-770
- [160] Sheridan, T.: Humans and Automation – System Design and Research Issues. John Wiley & Sons, 2002

- [161] Shorrock, S.; Kirwan, B.: The development of TRACer - A technique for the retrospective analysis of cognitive errors in ATM. *Engineering psychology and cognitive ergonomics. Vol. 3 – Transportation systems, medical ergonomics and training*. Oxford, 1999, S. 163-171
- [162] Sklet, S.: Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (2006) S. 494-506
- [163] Stanton, N.A.; Salmon, P.M.; Walker, G.H.; Baber, C.; Jenkins, D.P.: Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering And Design. Ashgate, 2006
- [164] Sträter, O.: Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit auf Basis von Betriebserfahrung. Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Diss. TU München, 1997
- [165] Sträter, O.; Reer, B.; Dang, V.; Hirschberg, S.: Methoden zur Analyse von kognitiven Fehlern: Ergebnisse einer ersten Anwendung von Methoden und Ausblicke auf zukünftige Arbeiten. Beitrag zum 4. Expertengespräch „Mensch-Maschine-Wechselwirkung“. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 1999
- [166] Sträter, O.; Dang, V.; Kaufer, B.; Daniels, A.: On the way to assess errors of commission. *Reliability Engineering and System Safety* 83 (2004) 2, S. 129-138
- [167] Sträter, O.: Considerations on the elements of quantifying human reliability. *Reliability Engineering and System Safety* 83 (2004) 2, S. 255-264
- [168] Sträter, O.: Cognition and Safety – An Integrated Approach to Systems Design and Performance Assessment. Ashgate, 2005
- [169] Sträter, O.: Modellierung menschlichen Verhaltens in komplexen Arbeitssystemen, In: Lehrstuhl für Ergonomie der TU München (Hrsg.): *Ergonomie aktuell* 6 (2005), <http://www.lfe.mw.tu-muenchen.de/aktuelles/zeitung/zeitung6.pdf>, abgerufen am 2009-11-28
- [170] Sträter, O.: Eine industrie-übergreifende Perspektive zur Vorhersage und Gestaltung technischer Systeme hinsichtlich menschlichen Verhaltens. *TÜV Süd Symposium „Menschliche Zuverlässigkeit: Analyse, Kategorisierung, Quantifizierung“*, München, 2006

- [171] Swain, A.; Guttman, H.: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Sandia National Labs, US Nuclear Regulatory Commission. Washington D.C., 1983
- [172] Timpe, K.-P.; Kolrep, H.: Das Mensch-Maschine-System als interdisziplinärer Gegenstand. In: Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T.; Kolrep, H.: *Mensch-Maschine-Systemtechnik – Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. Symposium publishing, Düsseldorf, 2002, S. 9-40
- [173] Traub, P.: Human Error Analysis in Railway Safety Cases; Panacea or Poison? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2004, Perception and Performance, S. 2065-2069, 2004
- [174] Ugajin, H.: Human Factors Approach to Railway Safety. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute (Japan)* 40 (1999) 1, S. 5-8
- [175] Unbekannter Verfasser: Human factors contribution to quantitative methods survey. Progress in Maintenance and Management of Railway Infrastructure. Contribution to Report to Council of Decision Makers, 2001-12-01, beziehbar über [133]
- [176] Union Industry of Signaling (UNISIG) (Hrsg.): Safety Requirements for the Technical Interoperability of ETCS in Levels 1 & 2 (Subset-091), Version 2.2.2 vom 2003-03-20
- [177] Union Internationale de Chemin de Fer (Internationaler Eisenbahnverband; UIC; Hrsg.): UIC 612 – Schnittstelle Triebfahrzeugführer–Maschine für Elektro- und Diesellokomotiven (EMU/DMU), Lokomotiven und Steuerwagen – Funktions- und Systemanforderungen für eine harmonisierte Schnittstelle Triebfahrzeugführer–Maschine, 1. Ausgabe, Juni 2009
- [178] Union Internationale de Chemin de Fer (Internationaler Eisenbahnverband; UIC; Hrsg.): UIC 651 – Gestaltung der Führerräume von Lokomotiven, Triebwagen, Triebwagenzügen und Steuerwagen, 4. Ausgabe, Juli 2002
- [179] Valancogne, J.: Prise en compte des facteurs humains pour la surveillance, la sûreté et la sécurité des systèmes à risques (Einbeziehung der menschlichen Einflussfaktoren auf die Überwachung und die Sicherheit sicherheitskritischer Systeme), Konferenzbeitrag zum *Séminaire sur l'Ingénierie des Facteurs Humains pour la Surveillance, la Sûreté et la Sécurité des Grands Systèmes*, Valenciennes, 2008

- [180] Vanderhaegen, F.: A non-probabilistic prospective and retrospective human reliability analysis method – application to railway system. *Reliability Engineering & System Safety* 71 (2001) 1, S. 1-13
- [181] Vanderhaegen, F.: The Benefit-Cost-Deficit (BCD) model for human error analysis and control. *9th IFAC/IFORS/IEA symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Atlanta, 2004
- [182] Verein Deutscher Ingenieure (VDI; Hrsg.): VDI 4006, Blatt 1: Menschliche Zuverlässigkeit – Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung. Beuth-Verlag, Berlin, 2002
- [183] Verein Deutscher Ingenieure (VDI; Hrsg.): VDI 4006, Blatt 2: Menschliche Zuverlässigkeit – Methoden zur quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit. Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [184] Verein Deutscher Ingenieure (VDI; Hrsg.): VDI 4006, Blatt 3: Menschliche Zuverlässigkeit – Methoden zur Ereignisanalyse (Gründruck). Beuth-Verlag, Berlin, 2010
- [185] Weber, C.: Eine Risikobetrachtung zum Zugleitbetrieb. *EI – Der Eisenbahningenieur* 61 (2010) 8, S. 18-23
- [186] Wegel, H.; Hansen, L.-H.: Sichere Bahn trotz hoher menschlicher Fehlermöglichkeiten. Analyse zur Robustheit des System Eisenbahn am Beispiel der Zugdateneingabe. Konferenzbeitrag zum 7. *Bieleschweig-Workshop „Systems Engineering“: Model-Based Development & Human-Centered Engineering*, München, 2006
- [187] van der Weide, R.: Human factors & human error in the rail industry – A systems perspective and a case study. First Conference *Rail Safety and Risk Assessment*, Amsterdam, 2009
- [188] Whalley, S.P.: Minimising the cause of human error. In: Kirwan, B.; Ainsworth, L.K. (Hrsg.): *A Guide to Task Analysis*. Taylor and Francis, London, 1988
- [189] Wickens, C.D.: *Engineering Psychology and Human Performance*. Merill Publishing, Toronto, 1984
- [190] Wickens, C.D.; Lee, J.; Liu, Y.; Becker, S.: *An Introduction to Human Factors Engineering*. 2. Aufl., Pearson, 2003

- [191] Williams, J.C.: HEART – A proposed method for assessing and reducing human error. 9th Advances in Reliability Technology Symposium, 1986
- [192] Wilson, J.R.; Norris, B.J.: Human factors in support of a successful railway: a review. *Cognition, Technology & Work* 8 (2006) 1, S. 4-14
- [193] Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, 2005
- [194] Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: People and Rail Systems: Human Factors at the Heart of the Railway, Ashgate publishing, 2007
- [195] Wilson, J.R.; Farrington-Darby, T.; Cox, G.; Bye, R.; Hockey, G.R.J.: The railway as a socio-technical system: human factors at the heart of successful rail engineering, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F, Journal of Rail and Rapid Transit* 221 (2007) 1, S. 101-115
- [196] Windberg, H.-J.: Über die Wechselwirkungen zwischen den beruflichen Anforderungen und der Gestaltung der Arbeitsplätze in Fahrberufen: am Beispiel der Entwicklung der Mensch-Maschine-Kommunikation auf den deutschen Eisenbahnen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund, 1991
- [197] Wisawayodhin, T.; Heape, S.; Li, G.; Turner, C.; Mills, A.: Driver Assessment of the Effectiveness of SPAD Mitigation Measures. In: Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: *People and Rail Systems: Human Factors at the Heart of the Railway*, Ashgate publishing, 2007, S. 483-490
- [198] Wright, L.; Dabekaussen, M.; van der Schaaf, T.: Predicting the Causes of SPAD Incidents. In: Wilson, J.R., Norris, B., Clarke, T., Mills, A.: *People and Rail Systems: Human Factors at the Heart of the Railway*, Ashgate publishing, 2007, S. 491-499
- [199] Young, M.S.; Stanton, N.A.; Walker, G.H.: In loco intellegentia: human factors for the future European train driver. *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 1 (2006) 4, S. 485-501
- [200] Zimolong, B.: Gegenstand und Entwicklung der Ingenieurpsychologie. In: Zimolong, B.; Konradt, U. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich D Praxisgebiete, Serie III Wirtschafts- Organisations- und Arbeitspsychologie, Band 2 Ingenieurpsychologie*, Hogrefe, 2006, S. 3-34

Abbildungsverzeichnis

2.1	Leitstellenarbeitsplatz (Foto: N. Jellentrup)	12
2.2	Arbeitsplatz im Führerstand (Foto: F. Feldmann)	12
2.3	Einordnung der <i>Rail human factors</i> in benachbarte Themen . . .	17
3.1	RASMUSSENS Modell verschiedener Ebenen menschlichen Verhaltens und Informationsverarbeitung (Darstellung aus [3])	33
3.2	Klassifikation menschlicher Fehler nach REASON [135], geringfügig erweitert auf der Basis von ANDERS [3]	35
3.3	Menschliche Einflussfaktoren auf die Systemverlässlichkeit (nach ANDERS [2], überarbeitet)	43
4.1	Tabellarisches Modell für die Klassifikation und Analyse menschlicher Fehler (Teil 1; Anschluss auf der gegenüberliegenden Seite)	74
4.2	Tabellarisches Modell für die Klassifikation und Analyse menschlicher Fehler (Teil 2)	75
4.3	Mensch-Maschine-System, eingebettet in Umgebung und Situation, Notation aus [184]	78
4.4	Regelungstechnische Notation für das Mensch-Maschine-System	80
4.5	Modell der Informationsverarbeitung nach STRÄTER [168] und [169]	83
4.6	Modellierung der Interaktionen zwischen Menschen und technischen Systemen im Eisenbahnverkehr	85
4.7	Mensch-Maschine-System des Triebfahrzeugführers (dunkel hinterlegt)	86
4.8	Komplexe Mensch-Maschine-Interaktion an den Arbeitsplätzen im Eisenbahnverkehr	87
4.9	Modellierung des Arbeitssystems mit Fokus auf leistungsbeeinflussenden Faktoren	88
4.10	Beispiel für ein Ursache-Wirkungs-Diagramm mit einigen leistungsbeeinflussenden Faktoren	94
5.1	Ausprägungen des Schweizer-Käse-Modells von REASON . . .	99

5.2	Prozess-Modell für Barrieren (nach POLET [124])	100
5.3	Bow-Tie-Model inklusive Verdeutlichung der Barrieren	101
5.4	Vorgehensweise der entwickelten Methodik	109
6.1	Ablaufschritte der Barrierenfunktion und Zuordnung zur klassischen und neuen Einteilung menschlicher Informationsverarbeitung . .	120
6.2	Die drei grundsätzlichen Typen der Mensch-Barrieren-Interaktion	122
6.3	Zusammensetzen der Mensch-Barrieren-Interaktion einer Barriere durch Kombination zweier Folien	123
6.4	Barrierensysteme-Varianten A1 bis A4 und B1 bis B4 der Mensch-Barrieren-Interaktion	124
6.5	Legende zur vorherigen Abbildung (Varianten A1 bis B4 der Mensch-Barrieren-Interaktion)	125
6.6	Barrierensysteme-Varianten C1 bis C6 der Mensch-Barrieren-Interaktion	128
6.7	Legende zur vorherigen Abbildung (Varianten C1 bis C6 der Mensch-Barrieren-Interaktion)	129
6.8	Verschiedene Ausprägungen der Varianten C1 und C2 der Mensch-Barrieren-Interaktion	142
6.9	Verschiedene Ausprägungen der Varianten C3 und C4 der Mensch-Barrieren-Interaktion	144
6.10	Barrieren der Typen A und B verknüpft mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler	148
6.11	Barrieren des Typs C1 verknüpft mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler	149
6.12	Barrieren des Typs C3/C4 verknüpft mit dem tabellarischen Modell menschlicher Fehler	150
6.13	Ablauf des Beispiels und zugehörige Tabellen und Abbildungen	163
6.14	ETCS Driver Machine Interface bei Fahrt unterhalb der Höchstgeschwindigkeit (links) und bei Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit (rechts), aus [104]	169
A.1	Zusammenstellung der Varianten der Mensch-Barrieren-Interaktion und ihre Zuordnung zu funktionalen, symbolischen und immateriellen Barrieren (Teil 1)	218
A.2	Zusammenstellung der Varianten der Mensch-Barrieren-Interaktion und ihre Zuordnung zu funktionalen, symbolischen und immateriellen Barrieren (Teil 2)	219

A.3	FTA für das Fahren einer zu hohen Geschwindigkeit auf freier Strecke	220
A.4	FTA für das Passieren eines Halt zeigenden Blocksignals	221
A.5	FTA für den Zusammenprall eines Zuges mit einem Straßenverkehrsteilnehmer (StVTn) an einem nichttechnisch gesicherten Bahnübergang	222
A.6	Hierarchische Aufgabenanalyse für den Triebfahrzeugführer (Ausschnitt)	223
A.7	Hierarchische Aufgabenanalyse für den Triebfahrzeugführer (Fahren auf freier Strecke)	224

Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Darstellungen.

Tabellenverzeichnis

3.1	Risikowahrnehmung verschiedener Beteiligter für verschiedene Arbeitsplätze	44
3.2	Menschliche Fehlerraten in einem sicherheitlichen Mensch-Maschine-System im Eisenbahnverkehr [77]	49
3.3	Zuordnung der Skalen zu den Niveaus der Ausdrucksformen	53
3.4	Einige der bekanntesten HRA-Verfahren der ersten Generation	54
3.5	Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler nach dem HUSARE-Toolkit [88]	58
3.6	Übersicht über die Eigenschaften der HRA-Verfahren	63
3.7	Ansätze und Methoden zur Berücksichtigung menschlicher Einflussfaktoren und ihre Vor- und Nachteile (Teil 1)	68
3.8	Ansätze und Methoden zur Berücksichtigung menschlicher Einflussfaktoren und ihre Vor- und Nachteile (Teil 2)	70
4.1	Leistungsbeeinflussende Faktoren (unabhängige Größen)	92
5.1	Schema zur Einteilung von Barrieren – hier eingetragen einige Beispiele für Barrieren gegen zu schnelles Fahren, Entgleisungen und entsprechende Folgen	104
5.2	Bewertung von Barrieren nach HOLLNAGEL und SKLET	105
6.1	Barrierenverarbeitung und -ausführung als Steuerung bei Barrieren Typen A und B	132
6.2	Barrierenverarbeitung und -ausführung als Regelung bei Barrieren Typ A	133
6.3	Zwei verschiedene Initiierungen bei Barrieren Typen A und B	134
6.4	Zuordnung verschiedener Signalverläufe zur aktiven und passiven Initiierung	135
6.5	Beispiel: Abgabe einer Warnung bei einem Hindernis im Gegen- gleis	137
6.6	Beispiel: <i>Langsamfahrt erwarten</i> zeigendes Vorsignal	138
6.7	Arten des Durchlaufs der kognitiven Verarbeitungsschleife	139

6.8	Einteilung der Häufigkeit	140
6.9	Einteilung der Verständlichkeit	140
6.10	Initiierung, Verarbeitung und Ausführung bei den verschiedenen Barrierenarten	146
6.11	Zustandekommen der Barrierenfunktion bei verschiedenen Abläufen auf Verhaltensebene	146
6.12	Hauptinteresse für menschliche Fehler nach Barrierenart	151
6.13	Zu bestimmende Wahrscheinlichkeit und Bewertung der Handlung auf Verhaltensebene nach Barrierenart	152
6.14	Übersicht über Barrierenarten, ihre Sicherheitsrisiken und entsprechende Bewertungsansätze	158
6.15	Vergleich zweier Barrieren mit der Mensch-Barrieren-Interaktion (Vorlage)	161
6.16	Aus der Fehlerbaumanalyse identifizierte Barrieren	164
6.17	Aus Tätigkeiten mit Sicherheitsfunktion abgeleitete Barrierensysteme und -funktionen	166
6.18	Aus Tätigkeiten mit Leistungsfunktion abgeleitete Barrierensysteme und -funktionen	167
6.19	Zusammenstellung der identifizierten Barrieren, Kategorisierung nach Barrierentyp und -art	168
6.20	Gegenüberstellung von Barrieren gegen zu hohe Geschwindigkeiten auf freier Strecke	171
7.1	Variante für eine semi-quantitative Bewertung der Fehleranfälligkeit der Barrieren des Typs A und B auf Basis der Kriterien der Mensch- Barrieren-Interaktion	175
7.2	Gegenüberstellung der Mensch-Barrieren-Interaktion und bestehen- der HRA-Verfahren	183
A.8	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 1	226
A.9	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Modifikation von Beispiel 2	228
A.10	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 4	229
A.11	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 5	231
A.12	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 6	232
A.13	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 7	233
A.14	Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Geschwin- digkeitsüberschreitung im ETCS-Display	234

A Abbildungen und Tabellen

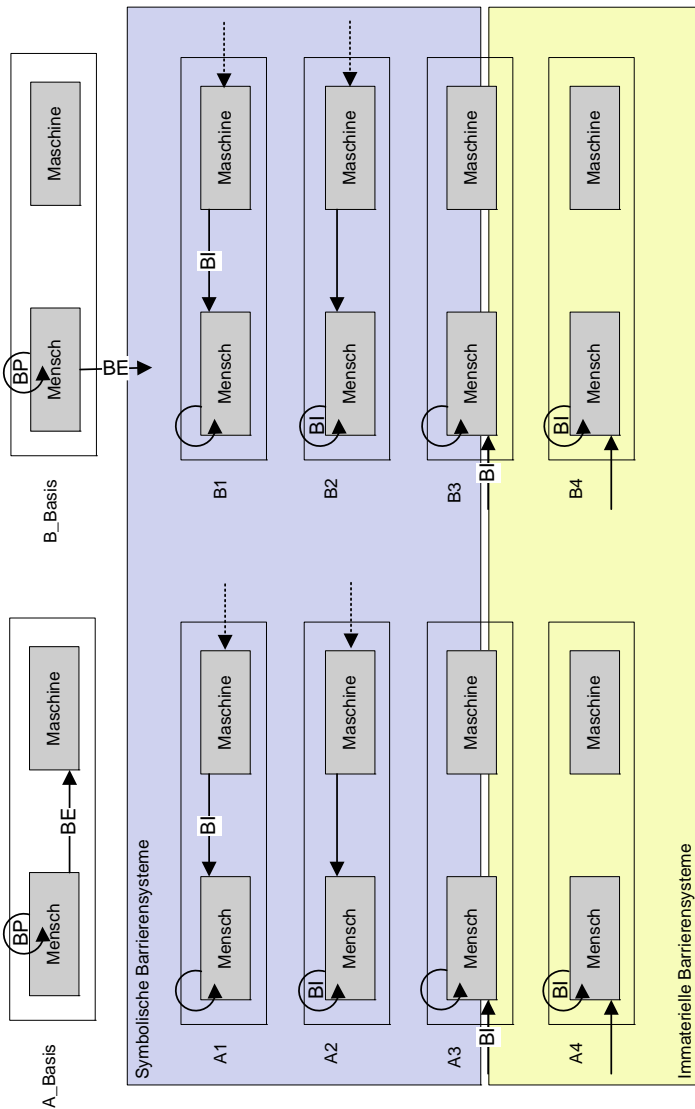


Abbildung A.1: Zusammenstellung der Varianten der Mensch-Barrieren-Interaktion und ihre Zuordnung zu funktionalen, symbolischen und immateriellen Barrieren (Teil 1)

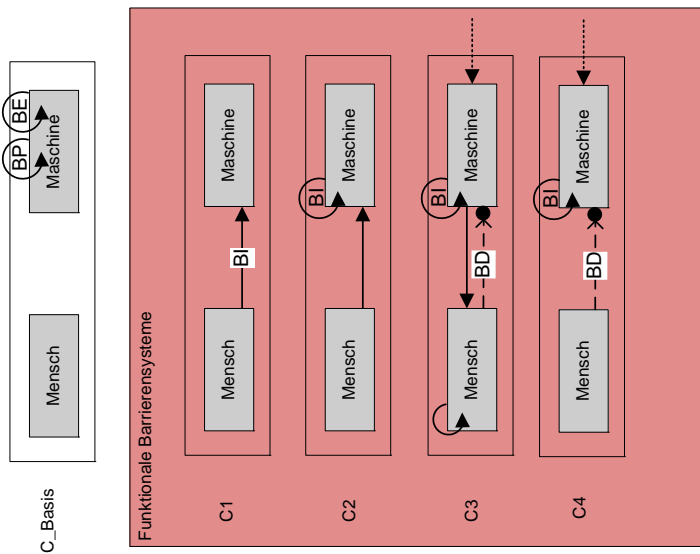


Abbildung A.2: Zusammenstellung der Varianten der Mensch-Barrieren-Interaktion und ihre Zuordnung zu funktionalen, symbolischen und immateriellen Barrieren (Teil 2)

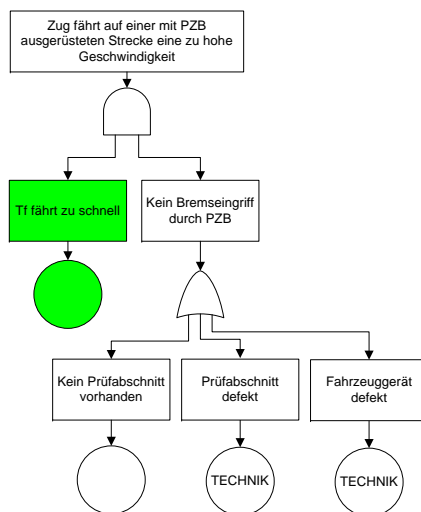


Abbildung A.3: FTA für das Fahren einer zu hohen Geschwindigkeit auf freier Strecke

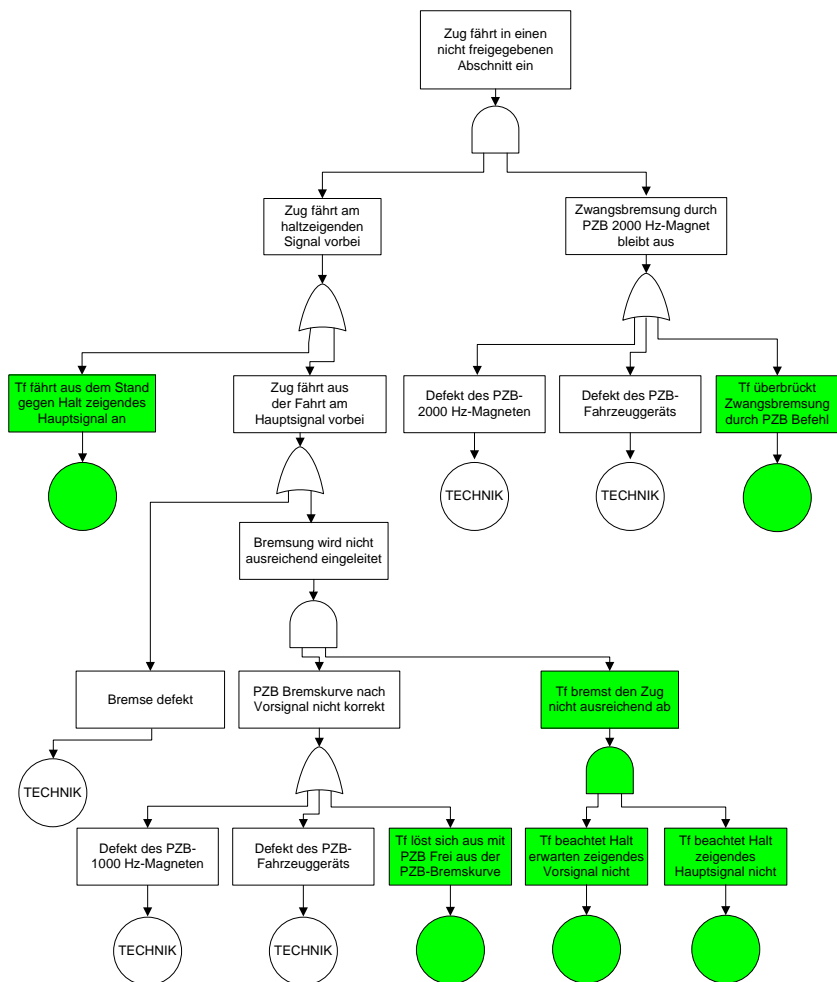


Abbildung A.4: FTA für das Passieren eines Halt zeigenden Blocksignals

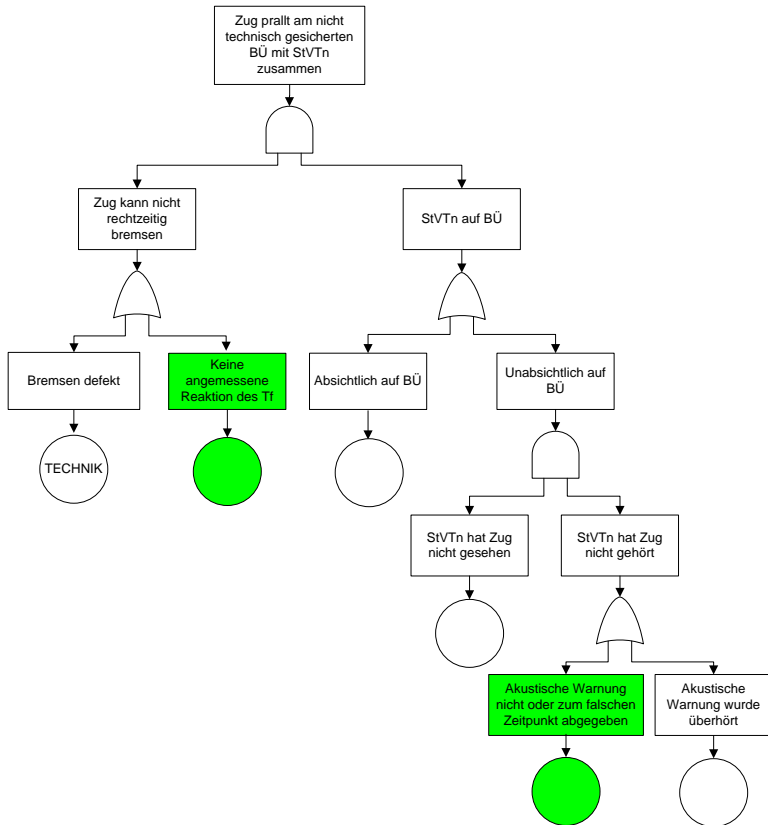


Abbildung A.5: FTA für den Zusammenprall eines Zuges mit einem Straßenverkehrsteilnehmer (StVTn) an einem nichttechnisch gesicherten Bahnübergang

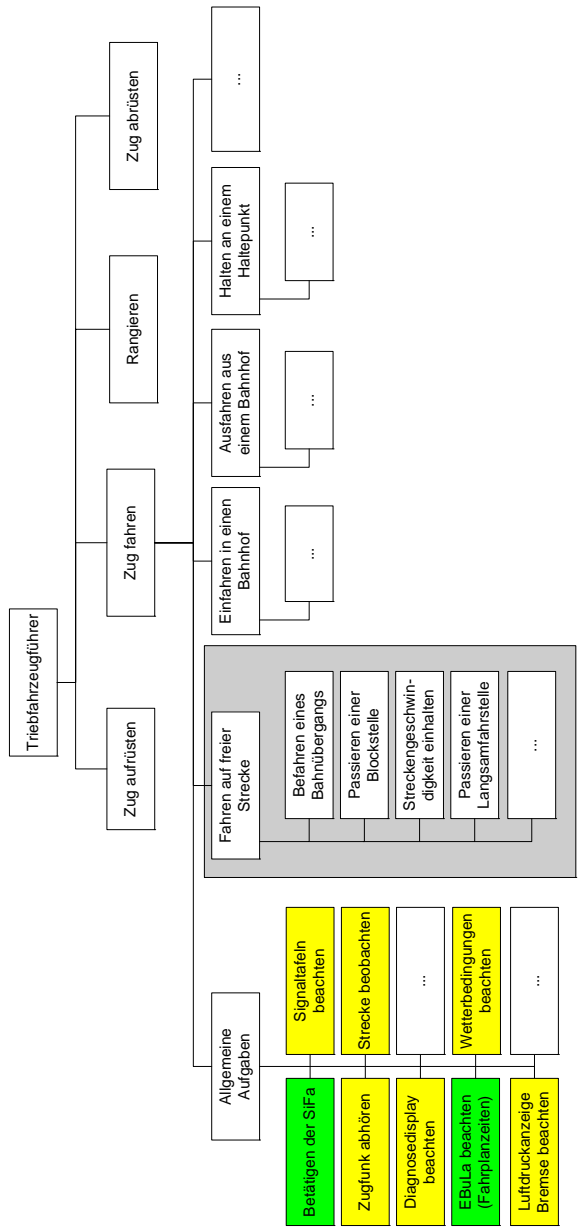


Abbildung A.6: Hierarchische Aufgabenanalyse für den Triebfahrzeugführer (Ausschnitt)

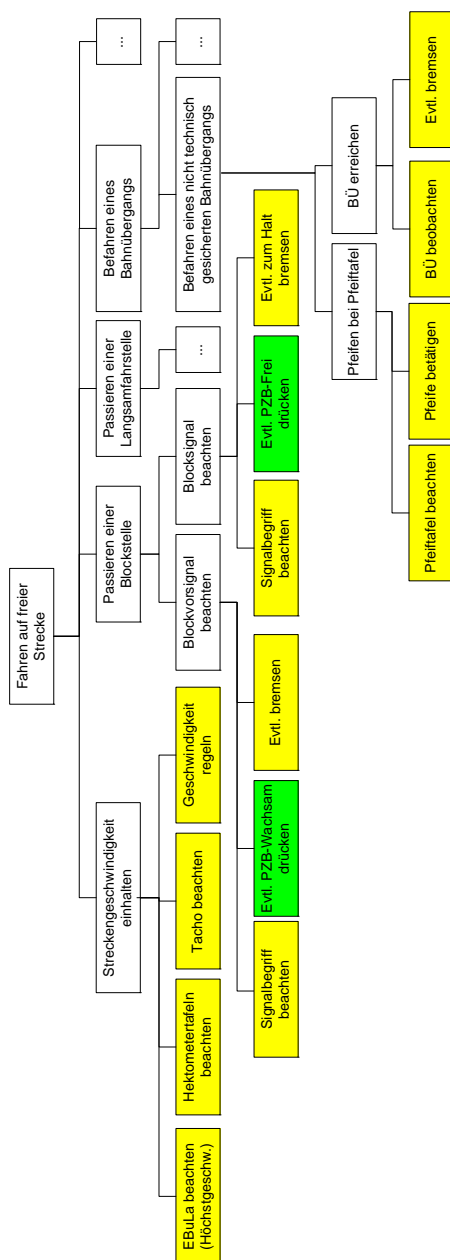
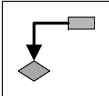
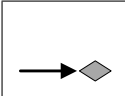
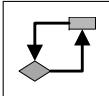
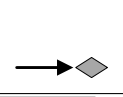
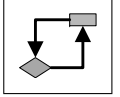
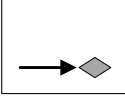
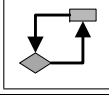
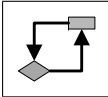


Abbildung A.7: Hierarchische Aufgabenanalyse für den Triebfahrzeugführer (Fahren auf freier Strecke)

Nr. im Beispiel	1		
Barrierenzweck	Einhaltung der Streckenhöchstgeschwindigkeit auf freier Strecke		
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere		
Barrierenart	A/B		
Barriersysteme	EBuLa	Hektometertafeln	Tacho
Klassifikation	Symbolisch	Symbolisch	Symbolisch
	Passive Initiierung	Passive Initiierung	Passive Initiierung
	A2	A2	A2
Barriereninitiierung	Sequentielle Wahrnehmung der drei Barriersysteme und Erkenntnis, dass die aktuelle Geschwindigkeit zu hoch ist		
Barrierenverarbeitung	Verständnis, dass Geschwindigkeit herunterzuregeln ist		
Barrierausführung	Kontrolle der Geschwindigkeit (Regelung)		
Barriereninitiierung	<p>1. </p> <p>2. </p> <p>3. </p> <p>4. </p> <p>5. </p> <p>6. </p> <p>7. </p>		
Barrierenverarbeitung			

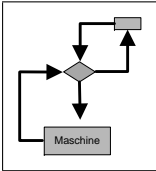
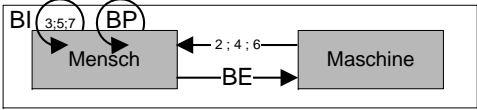
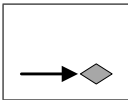
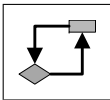
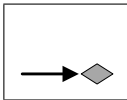
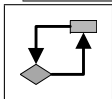
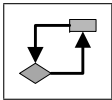
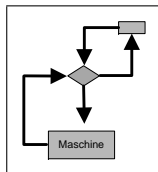
<div><div></div></div>	
Barrierausführung	
Deaktivierung / Fehler bei Leistungsfunktion	–
<div><div></div></div>	
Interaktionsdiagramm	
räumliche Distanz	Distanz zwischen streckenseitigen Hektometertafeln und Tacho und EBU-La im Führerstand
zeitliche Distanz	keine Distanz
Sinneskanalnutzung	Nutzung des visuellen Kanals durch alle drei Barriersysteme

Tabelle A.8: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 1

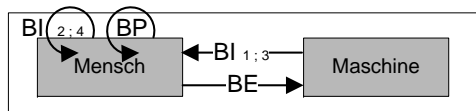
Nr. im Beispiel	Modifikation von Beispiel Nr. 2	
Barrierenzweck	Abbremsung auf Langsamfahrt nach einem <i>Langsamfahrt erwarten</i> zeigenden Vorsignal	
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere	
Barrierenart	A/B	
Barriersysteme	<i>Langsamfahrt erwarten</i> zeigendes Vorsignal	Tacho
Klassifikation	Symbolisch	Symbolisch
	Aktive Initiierung	Passive Initiierung
	A1	A2
Barriereninitiierung	Wahrnehmung des Vorsignals und des Tachos sowie die Erkenntnis, dass die aktuelle Geschwindigkeit zu hoch ist	
Barrierenverarbeitung	Verständnis, dass eine Bremsung einzuleiten ist	
Barrierausführung	Einleiten der Bremsung (Regelung)	
Barriereninitiierung	<p>1. </p> <p>2. </p> <p>3. </p> <p>4. </p>	
Barrierenverarbeitung		

Barrierausführung



Deaktivierung / Fehler
bei Leistungsfunktion –

Interaktionsdiagramm



räumliche Distanz	Distanz zwischen streckenseitigem Signal und Tacho im Führerstand
zeitliche Distanz	keine Distanz zwischen Barrierensystemen, evtl. Zeitspanne zum Bremseninsatzpunkt
Sinneskanalnutzung	Nutzung des visuellen Kanals durch beide Barrierensysteme

Tabelle A.9: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Modifikation von Beispiel 2

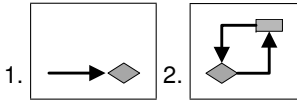
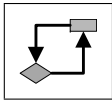

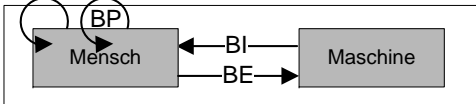
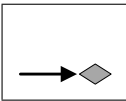
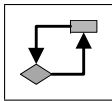
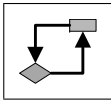

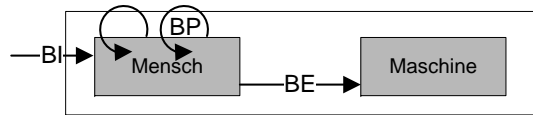
Nr. im Beispiel	4
Barrierenzweck	Akustische Warnung für Straßenverkehrsteilnehmer
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere
Barrierenart	A/B
Barriersysteme	Pfeiftafel
Klassifikation	Symbolisch Aktive Initiierung A1
Barriereninitiierung	Wahrnehmen der Tafel
Barrierenverarbeitung	Ableitung der Handlung <i>Pfeife betätigen</i>
Barrierenausführung	Durchführung der Handlung <i>Pfeife betätigen</i>
Barriereninitiierung	
Barrierenverarbeitung	
Barrierenausführung	
Deaktivierung / Fehler bei Leistungsfunktion	–
Interaktionsdiagramm	
räumliche Distanz	–
zeitliche Distanz	–
Sinneskanalnutzung	–

Tabelle A.10: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 4

Nr. im Beispiel	5
Barrierenzweck	Bremmung bei Erkennung von Hindernissen auf einem Bahnübergang
Klassifikation im Prozessmodell	Beherrschungsbarriere (evtl. Behebungsbarriere)
Barrierenart	A/B
Barriersysteme	Regel
Klassifikation	Immateriell Aktive Initiierung A3
Barriereiniiierung	Wahrnehmen des Hindernisses auf dem Bahnübergang
Barrierverarbeitung	Verständnis, dass eine Schnellbremsung eingeleitet werden muss
Barrierausführung	Durchführung der Handlung <i>Bremsen</i> durch Zurücklegen des Fahr-/Bremshebels
Barriereiniiierung	<div> <div>1. </div> <div>2. </div> </div>
Barrierverarbeitung	
Barrierausführung	
Deaktivierung / Fehler bei Leistungsfunktion	–



Interaktionsdiagramm

räumliche Distanz –

zeitliche Distanz –

Sinneskanalnutzung –

Tabelle A.11: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 5

Nr. im Beispiel	6
Barrierenzweck	Überwachung der Bremskurve durch die PZB
Klassifikation im Prozessmodell	Behebungsbarriere
Barrierenart	C3/C4
Barriersysteme	Technische Vorkehrung des PZB-On-Board-Geräts, die Bremskurve zu überwachen und bei Überschreitung einer Zwangsbremung auszulösen
Klassifikation	Funktional – C3
Barriereninitiiierung	Erhalt des Signals des 1000 Hz-Magneten
Barrierenverarbeitung	Ableitung der Sicherheitsfunktion <i>Überwachung der Bremskurve und Einleiten einer Zwangsbremung bei Überschreitung</i>
Barrierenausführung	Überwachung der Bremskurve und Einleiten einer Zwangsbremung bei Überschreitung
Barriereninitiiierung	–
Barrierenverarbeitung	–
Barrierenausführung	–
Deaktivierung / Fehler bei Leistungsfunktion	Drücken von <i>PZB frei</i> repräsentiert Deaktivierung der Barrierenfunktion
Interaktionsdiagramm	<pre> sequenceDiagram participant Mensch participant Maschine Mensch->>Mensch: BDP Maschine->>Maschine: BI Maschine->>Maschine: BP Maschine->>Maschine: BE Maschine->>Mensch: BDI Mensch->>Maschine: BDE Maschine-->>: ... </pre>
räumliche Distanz	–
zeitliche Distanz	–
Sinneskanalnutzung	–

Tabelle A.12: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 6

Nr. im Beispiel	7
Barrierenzweck	Zwangsbremung bei Unterlassung des Drückens von <i>PZB Wachsam</i> am Halt erwarten zeigenden Vorsignal
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere
Barrierenart	C1
Barriersysteme	Technische Vorkehrung des PZB-On-Board-Geräts, bei unterlassenem Drücken von <i>PZB Wachsam</i> nach einer 1000 Hz-Beeinflussung eine Zwangsbremung auszulösen
Klassifikation	Funktional – C1
Barriereninitiiierung	Unterlassen der Betätigung von <i>PZB Wachsam</i>
Barrierenverarbeitung	Ableitung der Sicherheitsfunktion <i>Einleiten einer Zwangsbremung</i>
Barrierausführung	Zwangsbremung
Barriereninitiiierung	–
Barrierenverarbeitung	–
Barrierausführung	–
Deaktivierung / Fehler bei Leistungsfunktion	Fehler bei der Leistungsfunktion <i>PZB Wachsam drücken</i> führt zur Barriereninitiiierung
Interaktionsdiagramm	<pre> sequenceDiagram participant Mensch participant Maschine Mensch->>Mensch: PFP Mensch->>Maschine: PFI Maschine-->>Maschine: BP Maschine-->>Maschine: BE Maschine-->>Mensch: PFF=BI </pre>
räumliche Distanz	–
zeitliche Distanz	–
Sinneskanalnutzung	–

Tabelle A.13: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Beispiel 7

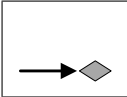
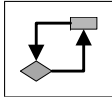
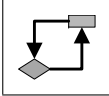

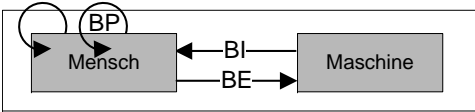
Nr. im Beispiel	–
Barrierenzweck	Vermeidung von zu schnellem Fahren
Klassifikation im Prozessmodell	Verhütungsbarriere
Barrierenart	A/B
Barriersysteme	orange eingefärbte Tachonadel im ETCS-Display
Klassifikation	Symbolisch Aktive Initiierung A1
Barriereninitiierung	Wahrnehmen der orangefarbenen Tachonadel
Barrierenverarbeitung	Ableitung der Handlung <i>Bremsen</i>
Barrierausführung	Durchführung der Handlung <i>Bremsen</i> durch Zurücklegen des Fahr-/Bremshebels
Barriereninitiierung	<div> <div>1. </div> <div>2. </div> </div>
Barrierenverarbeitung	
Barrierausführung	
Deaktivierung / Fehler bei Leistungsfunktion	–
Interaktionsdiagramm	
räumliche Distanz	–
zeitliche Distanz	–
Sinneskanalnutzung	–

Tabelle A.14: Qualitative Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion, Geschwindigkeitsüberschreitung im ETCS-Display